



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria  
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE FINAL DE CARRERA

Estudio comparativo de cálculos de Tiempo  
de Reverberación de salas mediante  
simulación basada en trazado de rayos

*Comparative Study of Room Reverberation  
Time Calculations Based on Ray Tracing  
Simulation*

*Estudis: Enginyeria de Telecomunicació*

*Autor: Daniel Marín Pérez*

*Director/a: Alexander Heldring*

*Any: 2016*



# Índice general

Índice general .....	1
Colaboraciones .....	5
Agradecimientos .....	6
Resum del Projecte .....	7
Resumen del Proyecto .....	8
Abstract .....	9
1 Introducción .....	10
1.1 Contexto del proyecto.....	10
1.2 Motivación .....	12
1.3 Objetivos .....	13
1.4 Estructura de la memoria .....	14
2 Tiempo de Reverberación .....	15
2.1 Conceptos fundamentales del sonido .....	15
2.1.1 Definición del sonido.....	15
2.1.2 Nivel de presión sonora.....	16
2.1.3 Tipos de fuentes de sonido .....	16
2.1.4 Bandas de octava y tercio de octava .....	17
2.1.5 Tipos de sonido. Ruido rosa .....	19
2.2 Conceptos sobre el $RT$ .....	20
2.2.1 Definición de $RT$ .....	20
2.2.2 Curva energía-tiempo ( $ETC$ ) .....	20
2.2.3 Integración de <i>Schröder</i> .....	21
2.2.4 Parámetros indicadores de $RT$ .....	21
2.2.5 Valores recomendados de $RT$ .....	22
2.3 Modelos acústicos .....	24
2.3.1 Modelo ondulatorio .....	24
2.3.2 Modelo estadístico .....	24

2.3.3	Modelo geométrico .....	25
2.4	Fórmulas clásicas de <i>RT</i> .....	28
2.4.1	Absorción de los materiales .....	28
2.4.2	Libre camino medio .....	29
2.4.3	Formulación de <i>Sabine</i> .....	30
2.4.4	Formulación de <i>Eyring</i> .....	31
2.4.5	Limitaciones de la formulación clásica .....	31
3	Simulación acústica. <i>EASE</i> y <i>CATT</i> .....	33
3.1	Métodos de simulación .....	33
3.1.1	Requerimientos previos .....	33
3.1.2	<i>Image Source</i> o <i>Mirror Image</i> .....	34
3.1.3	<i>Ray Tracing</i> .....	35
3.2	<i>Enhanced Acoustic Simulator for Engineers (EASE)</i> .....	37
3.2.1	<i>Room RT</i> y <i>Room Data</i> .....	37
3.2.2	<i>Local Decay Time</i> .....	39
3.2.3	<i>Local Ray Tracing (Ray Tracing Impacts)</i> .....	40
3.2.4	<i>Local Ray Tracing (Mirror Image Impacts)</i> .....	43
3.2.5	<i>Analysis Utility for Room Acoustics (AURA)</i> .....	43
3.3	<i>Computer Aided Theater Technique (CATT)</i> .....	48
3.3.1	<i>The Universal Cone Tracer (TUCT)</i> .....	49
3.3.2	<i>Interactive RT estimation (CATT)</i> .....	50
3.3.3	<i>Predict SxR (TUCT)</i> .....	52
4	Resultados de <i>RT</i> . Recinto simple .....	55
4.1	Presentación del recinto simple .....	55
4.1.1	Hipótesis y premisas .....	55
4.1.2	Protocolo de simulación .....	56
4.1.3	Datos y modelo de simulación .....	57
4.1.4	<i>RT</i> de <i>Sabine</i> y <i>Eyring</i> .....	59
4.1.5	Aspectos a analizar .....	60
4.2	Resultados <i>Local Decay Time (EASE)</i> .....	61
4.2.1	Convergencia .....	61
4.2.2	Tiempos de simulación .....	64

4.2.3 Validez de resultados .....	65
4.3 Resultados <i>Ray Tracing Impacts</i> (EASE) .....	66
4.3.1 Convergencia.....	66
4.3.2 Tiempos de simulación .....	68
4.3.3 Validez de resultados .....	69
4.4 Resultados <i>AURA</i> (EASE).....	71
4.4.1 Convergencia.....	71
4.4.2 Tiempos de simulación .....	72
4.4.3 Validez de resultados .....	74
4.5 Resultados <i>Interactive RT Estimation</i> (CATT) .....	75
4.5.1 Convergencia.....	75
4.5.2 Tiempos de simulación .....	75
4.5.3 Validez de resultados .....	75
4.6 Resultados <i>Predict SxR</i> (TUCT).....	77
4.6.1 Convergencia.....	77
4.6.2 Tiempos de simulación .....	78
4.6.3 Validez de resultados .....	80
4.7 Influencia de las ubicaciones de fuente y receptor .....	81
4.7.1 Ubicaciones de la fuente sonora de excitación .....	81
4.7.2 RT de las combinaciones emisor-receptor (EASE).....	82
4.7.3 RT de las combinaciones emisor-receptor (CATT).....	83
4.8 Influencia de la absorción.....	84
4.8.1 RT en función del coeficiente de absorción (EASE) .....	84
4.8.2 RT en función del coeficiente de absorción (CATT) .....	86
4.9 Influencia del <i>scattering</i> .....	89
4.9.1 Simulaciones con <i>scattering</i> en <i>AURA</i> (EASE) .....	89
4.9.2 Simulaciones con <i>scattering</i> en <i>Predict SxR</i> (TUCT) .....	91
4.10 Influencia de la geometría .....	95
4.10.1 Variación de las dimensiones del recinto .....	95
4.10.2 Variación de la geometría del recinto.....	96
5 Resultados de RT. <i>Sala Polivalent</i> .....	99

5.1	Introducción.....	99
5.2	Métodos de medición <i>in situ</i> de <i>RT</i> .....	99
5.2.1	Método del sonido impulsivo .....	99
5.2.2	Método <i>Maximum Length Sequence (MLS)</i> .....	100
5.2.3	Método <i>ESS</i> (barrido frecuencial exponencial) .....	101
5.3	Medición de <i>RT. Sala Polivalent</i> .....	103
5.3.1	Presentación de la <i>Sala Polivalent</i> .....	103
5.3.2	Condiciones de medición en la sala .....	104
5.3.3	Equipos y protocolo de medición del <i>RT</i> .....	104
5.3.4	Posiciones de fuente sonora y puntos de medición .....	106
5.3.5	Resultados de <i>RT</i> .....	107
5.4	Simulación de la <i>Sala Polivalent</i> .....	108
5.4.1	Construcción del modelo en <i>AutoCAD</i> .....	108
5.4.2	Materiales y coeficientes de absorción y difusión.....	108
5.4.3	Datos del modelo y <i>RT</i> estadístico ( <i>EASE</i> ) .....	109
5.4.4	Resultados de <i>RT</i> con <i>AURA (EASE)</i> .....	111
5.4.5	Datos del modelo y <i>RT</i> estadístico ( <i>CATT</i> ) .....	112
5.4.6	Resultados de <i>RT</i> con <i>Predict SxR (TUCT)</i> .....	113
6	Conclusiones.....	115
6.1	Simulación con <i>EASE</i> y <i>CATT</i> .....	115
6.1.1	Interfaz y funcionalidad.....	115
6.1.2	Rutinas y ajustes de cálculo.....	115
6.1.3	Convergencia de resultados .....	116
6.1.4	Tiempos de simulación .....	118
6.1.5	Validez de resultados .....	118
6.2	Simulación vs formulación clásica .....	120
6.3	Mediciones .....	121
6.4	Dificultades encontradas .....	124
7	Apéndice. Cotas de ubicaciones de fuente y puntos de medida ....	125
8	Anexo. Especificaciones de los equipos de medición.....	126
9	Referencias.....	127

## Colaboraciones



# Agradecimientos

*Quisiera agradecer a mi familia y amigos por su apoyo, especialmente a Sergi, J.M. Ollé, Romà y Marianna.*

*A mis ex compañeros de Audioscan Ferran, Mercedes y Anna.*

*Al CETIT por permitirme alquilar los equipos de medición. También a Enric y Isidre de Sonodos por el material prestado y a Pere por facilitarme el acceso a la Sala Polivalent.*

*A Cristina por los ánimos y estar pendiente cada día.*

*Y especialmente a Alex Heldring por ofrecerme la oportunidad de realizar el PFC sin condiciones en unas circunstancias difíciles para mí.*



## Resum del Projecte

En el present document s'analitzen dos eines informàtiques utilitzades en el càlcul de paràmetres acústics i electroacústics. Els paquets *software* contemplats en aquest estudi són: *Enhanced Acoustic Simulator for Engineers (EASE)* i *Computer Aided Theater Technique (CATT)*. Tots dos són àmpliament utilitzats i, de forma particular, es fan servir actualment en la realització de pràctiques de les assignatures Acústica i Electroacústica I i II del Grau en Enginyeria de Tecnologies i Serveis de Telecomunicació: Sistemes Audiovisuais de l'ETSETB.

L'objectiu principal de l'estudi és determinar i avaluar els diferents mètodes que els dos programes utilitzen per a calcular el temps de reverberació ( $RT$ ). Per tal d'assolir aquest objectiu es desenvolupen les següents tasques: comparar els resultats d'ambdós *softwares* en realitzar simulacions de l'esmentat paràmetre sota determinades hipòtesis; enunciar els ajustos de càlcul necessaris per a aconseguir valors convergents i discutir-ne la validesa, comparant-los amb la formulació teòrica; i observar l'evolució del cost computacional de les diferents rutines informàtiques.

També es realitzen mesures *in situ* del temps de reverberació en un recinte real amb l'objectiu de valorar les possibles diferències entre els resultats obtinguts a partir d'aquestes mesures i els procedents de l'estimació de  $RT$  de la mateixa sala mitjançant els paquets de simulació.

La utilitat d'aquesta anàlisi rau en l'obtenció d'un criteri definit a l'hora de predir i interpretar el temps de reverberació d'una sala que s'obté de les estimacions realitzades pels dos *softwares* estudiats.

# Resumen del Proyecto

En el presente documento se analizan dos herramientas informáticas utilizadas en el cálculo de parámetros acústicos y electroacústicos. Los paquetes de *software* contemplados en este estudio son *Computer Aided Theater Technique (CATT)* y *Enhanced Acoustic Simulator for Engineers (EASE)*. Ambos son ampliamente utilizados y, de forma particular, se usan actualmente en la realización de prácticas de las asignaturas *Acústica I y II* del *Grau en Enginyeria de Technologies i Serveis de Telecomunicació: Sistemes Audiovisuals* de la *ETSETB*.

El objetivo principal del estudio es determinar y evaluar los distintos métodos que los dos programas disponen para el cálculo del tiempo de reverberación (*RT*). Para alcanzar este objetivo se llevan a cabo las siguientes tareas: comparar los resultados de ambos *softwares* al realizar simulaciones del citado parámetro bajo determinadas hipótesis; enunciar los ajustes de cálculo necesarios para conseguir valores convergentes y discutir la validez de los mismos, comparándolos con la formulación teórica; y observar la evolución del coste computacional de las distintas rutinas informáticas.

También se realizan mediciones *in situ* del tiempo de reverberación en un recinto real con el fin de valorar las posibles diferencias entre los resultados obtenidos a partir de esas mediciones y los que proceden de la estimación de *RT* de la misma sala mediante los paquetes de simulación.

La utilidad de este análisis reside en la obtención de un criterio definido a la hora de predecir e interpretar el tiempo de reverberación de una sala que se obtiene de las estimaciones realizadas por los dos *softwares* estudiados.

## Abstract

The current paper analyses two computing tools used in the calculation of acoustic and electroacoustic parameters. These software programs are Enhanced Acoustic Simulator for Engineers (EASE) and Computer Aided Theater Technique (CATT). Both simulators are widely used and are covered in the practicum of the following classes: *Acústica i Electroacústica I* and *II* which are courses that belong to the *Grau en Enginyeria de Tecnologies i Serveis de Telecomunicació: Sistemes Audiovisuals (ETSETB)*.

The main goal of this project is to evaluate the different methods that these acoustic simulators use to estimate the reverberation time (RT). To achieve this goal, the following tasks were carried out: the RT results obtained from both software programs under specific hypotheses were compared; the necessary calculation settings to get converging values were stated and their validity was discussed with reference to their theoretical formulation; and the evolution of the computational time when varying routine selectable settings was observed.

Reverberation time *in situ* measurements were also obtained in a real room in order to evaluate the potential differences between the results obtained with the measurements and those from the acoustic simulators.

The contribution of this study lies in the capability to provide a criterion to predict and interpret the reverberation time estimated via the two software programs analysed.

# 1 Introducció

## 1.1 Contexto del proyecto

El tiempo de reverberación o *RT* (*Reverberation Time*) es el parámetro más relevante en la caracterización acústica de un recinto [1]. Si bien la definición formal aparece en el siguiente capítulo, este valor expresa el tiempo de decaimiento del campo sonoro en una sala.

Una muestra de la importancia de este parámetro es el hecho que otros indicadores acústicos de interés dependen y están íntimamente relacionados con el tiempo de reverberación. Es el caso, por ejemplo, del *%ALcons*, *STI* y *RASTI* que determinan el grado de inteligibilidad de la palabra en un determinado espacio [2] o del *Br* y el *BR* que hacen referencia, respectivamente, al brillo y la calidez de la música en una sala [3]. También documentos de tipo regulador como la *Ordenança del Medi Ambient de Barcelona* [4] o el Código Técnico de la Edificación (CTE) [5] indican valores determinados de *RT* en locales y establecimientos con el fin de garantizar unas correctas condiciones acústicas.

Así pues, resulta de gran interés conocer el valor de este parámetro y para tratar de obtenerlo se pueden distinguir distintas formas.

Las herramientas de predicción más sencillas de aplicar son las ecuaciones basadas en la teoría estadística, entre las que se encuentran las formulaciones clásicas de *Sabine* [6] y *Eyring* [7]. A pesar de que actualmente se continúan utilizando, presentan limitaciones y requieren el cumplimiento de ciertas condiciones, tal y como veremos en el capítulo 2. Existen también otras expresiones analíticas que son modificaciones de estas primeras como pueden ser la de *Millington and Sette* [8] o que derivan y presentan algunas correcciones como la de *Fitzroy* [9], *Kuttruff* [10] o *Arau-Puchades* [11].

La realización de medidas *in situ* se antoja como la forma más fiable puesto que nos encontramos bajo las condiciones y espacio reales. Aun así, los distintos métodos existentes en función de la señal de excitación, el rango dinámico disponible frente al ruido de fondo o las diferentes ubicaciones de la fuente emisora y las posiciones receptoras pueden arrojar resultados variables [12]. Además, el no poseer la autorización necesaria de acceder al recinto o simplemente cuestiones logísticas pueden dificultar la realización de medidas en el espacio en cuestión. Evidentemente, este

método queda descartado cuando se requiere conocer el valor del tiempo de reverberación en fase de diseño.

La simulación por ordenador es uno de los métodos más extendidos en el ámbito de las ingenierías y cuando aparecen las limitaciones anteriormente citadas se erige como una forma muy práctica. Estimar el valor de  $RT$  resulta posible incluso de forma previa a la construcción del recinto creando un modelo en 3D mediante herramientas de diseño asistido por ordenador. La implementación más habitual para obtener el tiempo de reverberación en estos programas informáticos se basa en el trazado de rayos (*Ray Tracing*), el cual se trata en el capítulo 3.

## 1.2 Motivación

De los distintos simuladores acústicos existentes en el mercado, el presente trabajo trata los dos siguientes: *Enhanced Acoustic Simulator for Engineers (EASE)* y *Computer Aided Theater Technique (CATT)*. Estos dos paquetes *software* se encuentran entre los más utilizados por ingenierías y consultorías acústicas.

Respecto a la predicción del tiempo de reverberación en un recinto mediante los dos programas contemplados surgen un conjunto de interrogantes. La elección de los diferentes métodos presentes en cada uno de los simuladores, el ajuste de los diferentes parámetros existentes, la ubicación de la fuente sonora de excitación o los puntos de recepción sobre los que medir el parámetro objeto de estudio son variables que repercuten en el *RT*. Esto significa que el resultado obtenido puede variar de un punto a otro del espacio pero, cuando tratamos el concepto de tiempo de reverberación, nos referimos implícitamente a un valor global. El no disponer, por tanto, de un resultado objetivo que actúe como verdadero merece claramente una discusión.

Resulta interesante el hecho de que ambos programas formen parte de los laboratorios de las asignaturas de *Acústica i Electroacústica* de la especialidad *Sistemes Audiovisuals* del *Grau en Enginyeria de Tecnologies i Serveis de Telecomunicació*. La posibilidad de que el contenido y las conclusiones derivadas de este estudio puedan servir de utilidad para estas sesiones de prácticas supone una motivación adicional.

## 1.3 Objetivos

Ante la problemática anteriormente expuesta, el objetivo del trabajo se centra en analizar y comprender los distintos métodos utilizados tanto por *EASE* como por *CATT* para el cálculo del tiempo de reverberación, comparándolos entre sí, y observar la variabilidad de los resultados en función de los distintos parámetros ajustables con el fin de obtener valores convergentes.

Otra de las tareas desarrolladas en el presente documento es analizar la influencia de la geometría y dimensiones del recinto, así como la absorción acústica de los materiales que configuran el espacio estudiado.

También es parte importante del estudio valorar el resultado de las simulaciones y, aun asumiendo la inexistencia de un valor “verdadero” de *RT*, encontrar una referencia que permita establecer unos márgenes de validez.

Por último, resulta interesante comparar los resultados de tiempo de reverberación obtenidos de una medición *in situ* con los valores estimados mediante simulación informática, con el fin de comprender a qué se deben las posibles discrepancias entre los datos proporcionados por estos métodos.

## 1.4 Estructura de la memoria

En el capítulo 2 del presente documento se explican algunos conceptos sobre el sonido y los diferentes modelos acústicos. Se define el tiempo de reverberación y los parámetros básicos para su cálculo. También se muestran las fórmulas clásicas teóricas y sus limitaciones.

En el capítulo 3 se explican los métodos más importantes en los que se basan muchos de los programas de simulación y concretamente las rutinas de los *softwares* estudiados *EASE* y *CATT*.

El capítulo 4 muestra el resultado de las simulaciones de *RT* realizadas con los programas analizados para un recinto sencillo y se evalúan diferentes aspectos teniendo como referencia la formulación clásica.

En el capítulo 5 se simula un recinto real con *EASE* y *CATT* y los valores resultantes de *RT* se comparan con los obtenidos de las mediciones *in situ* efectuadas.

El capítulo 6 está destinado a las conclusiones extraídas del trabajo realizado.

El apéndice y anexo contienen la información de las ubicaciones de los puntos de recepción y fuente sonora de las mediciones y las especificaciones de los equipos usados en ellas.



## 2 Tiempo de Reverberación

### 2.1 Conceptos fundamentales del sonido

#### 2.1.1 Definición del sonido

Entre las diversas formas de definir el concepto de sonido podemos decir que se trata de una sensación auditiva producida por una vibración mecánica que se transmite a través de un medio elástico y denso [13]. Así pues, a diferencia de las ondas electromagnéticas, el sonido no puede propagarse en el vacío.

Habitualmente dicha perturbación física se propaga a través del aire causando una alteración de la presión o desplazamiento de las partículas de este medio produciendo fenómenos de compresión y dilatación (presión total por encima y por debajo, respectivamente, de la presión atmosférica estática).

La presión total (en Pascals) en un punto en función del tiempo sigue esta expresión:

$$P_t(x, y, z, t) = P_0 + P(t) \text{ [Pa]} \quad [2-1]$$

$P_0$ =presión atmosférica estática

$P(t)$ =presión asociada a la onda sonora

La ecuación de la presión asociada a la onda sonora, en función del tiempo, según la dirección de propagación  $x$  es:

$$P(t) = A \cos \left( 2\pi f t - \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) x \right) \text{ [Pa]} \quad [2-2]$$

$A$ =amplitud máxima de la presión sonora

$f$ =frecuencia de oscilación de la onda sonora

$x$ =punto en la dirección de propagación

$\lambda=c/f$ , longitud de onda, donde  $c$ =velocidad de propagación del sonido

La velocidad de propagación del sonido en el aire se define a través de parámetros como la presión estática o densidad pero otros factores como la humedad también tienen cierta influencia [14]. No obstante, resulta suficientemente preciso calcularla mediante esta expresión:

$$c = 331,4 + 0,607T \text{ [m/s]} \quad [2-3]$$

$T$ : temperatura ambiente en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )

### 2.1.2 Nivel de presión sonora

El rango de valores de presión producidos por el sonido es grande. La presión mínima que se requiere para percibir sensación auditiva a la frecuencia de 1 kHz se sitúa en  $P_{ref}=20 \mu Pa$  mientras que el umbral de dolor lo encontramos alrededor de 200 Pa (valores de presión eficaces).

Puesto que el margen dinámico es muy amplio se define una magnitud logarítmica llamada Nivel de Presión Sonora (*SPL*).

$$L_p = 20 \log\left(\frac{P_{ef}}{P_{ref}}\right) [dB SPL] \quad [2-4]$$

$P_{ef}=\frac{A}{\sqrt{2}}$ , presión eficaz calculada a partir de [2-2]

$P_{ref}=20 \mu Pa$ , presión umbral de audición

### 2.1.3 Tipos de fuentes de sonido

Una posible clasificación de fuentes sonoras puede realizarse en función de su directividad.

Así pues nos encontramos con los siguientes casos:

#### a) Fuentes omnidireccionales

Son las que radian el sonido en todas las direcciones del espacio por igual. Esta propiedad depende de las dimensiones de la fuente sonora, de las frecuencias radiadas y de su ubicación [15]. Existen algunos sistemas de altavoces como el de la figura, utilizados en mediciones de parámetros acústicos, que pretenden aproximar esta característica de radiación.



Figura 2.1: Recinto acústico dodecaedro CESVA BP012

### a) Fuentes directivas

Son las que radian el sonido en una dirección preferente del espacio. Como se ha comentado, esta característica va asociada al contenido espectral que la fuente sonora reproduce siendo más directivas las frecuencias altas que las bajas [15].

La directividad de una fuente sonora se expresa mediante el factor  $Q$ , que para determinada dirección, distancia y en función de la frecuencia, se define de la siguiente forma:

$$Q(f) = \frac{P_f^2}{P_{ref}^2} \quad [2-5]$$

$P_f$ : presión eficaz de la fuente sonora directiva a una distancia y dirección determinadas

$P_{ref}$ : presión eficaz equivalente de una fuente con radiación omnidireccional

Los valores de  $Q$  oscilan entre 1 y  $\infty$ . Si este factor se expresa en decibelios obtenemos el índice de directividad  $DI$ .

$$DI = 10 \cdot \log Q \text{ [dB]} \quad [2-6]$$

$Q$ : factor de directividad de la fuente sonora

## 2.1.4 Bandas de octava y tercio de octava

La frecuencia es un parámetro muy importante en la caracterización del sonido. La percepción del ser humano comprende un rango que va desde 20 Hz a 20 kHz, aproximadamente. No obstante, debido a la no linealidad del oído, nuestra percepción de la frecuencia no varía proporcionalmente en relación a la misma sino que la sensibilidad hacia este parámetro responde a la excitación de las llamadas bandas críticas [16]. Nuestra percepción obedece más bien a una ley logarítmica [17].

En acústica es habitual dividir el espectro sonoro en distintas bandas frecuenciales para realizar los análisis acústicos pertinentes. Las representaciones más usuales que encontramos son las bandas de octava y de tercio de octava.

### a) Bandas de octava

Esta representación divide el espectro en bandas frecuenciales en las que las frecuencias límite que conforman cada banda cumplen lo siguiente:

$$f_2/f_1 = 2 \quad [2-7]$$

$f_1, f_2$ : frecuencia inferior y superior, respectivamente, de una banda de octava

## b) Bandas de tercio de octava

En este caso la relación entre las citadas frecuencias es:

$$f_2/f_1 = 2^{1/3} \quad [2-8]$$

$f_1, f_2$ : frecuencia inferior y superior, respectivamente, de una banda de tercio de octava

Teniendo en cuenta las relaciones anteriores la figura siguiente muestra las bandas de octava y tercio de octava existentes dentro del espectro audible, sus frecuencias centrales y los valores límite que las conforman.

frecuencias centrales (bandas de octava)		frecuencias centrales (tercios de octava)	
31.5	22	25	22
		31.5	28
63	44	40	35
		50	44
125	88	63	57
		80	71
250	176	100	88
		125	113
500	353	160	141
		200	176
1 K	707	250	225
		315	283
2 K	1414	400	353
		500	440
4 K	2828	630	565
		800	707
8 K	5650	1000	880
		1250	1130
16 K	11300	1600	1414
		2000	1760
		2500	2250
		3150	2828
		4000	3530
		5000	4400
		6300	5650
		8000	7070
		10000	8800
		12500	11300
		16000	14140
		20000	17600
	22500		22500
frecuencias límite (bandas de octava)		frecuencias límite (tercios de octava)	

Figura 2.2: Frecuencias centrales y límite de las bandas de octava y tercio de octava del espectro audible [18]

En ocasiones las bandas de octava analizadas en un estudio acústico son las comprendidas entre 125 Hz y 4 kHz.

## 2.1.5 Tipos de sonido. Ruido rosa

Los distintos sonidos pueden clasificarse en dos grandes grupos [19]:

### a) Sonidos deterministas

Estos sonidos pueden representarse mediante una expresión analítica concreta. En esta tipología se incluyen:

- Tonos puros: los sonidos que contienen una sola frecuencia.
- Sonidos armónicos: contienen una frecuencia fundamental y otras que son múltiplos de esta primera.
- Sonidos no periódicos: a esta categoría pertenecen sonidos transitorios que, aunque no son periódicos, se pueden representar en el dominio frecuencial [20].

### b) Sonidos aleatorios

Sonidos no deterministas que se estudian como un proceso estocástico a través de un análisis estadístico.

El ruido rosa pertenece a este último grupo y se caracteriza por proporcionar un nivel de presión sonora constante en todas las bandas de octava.

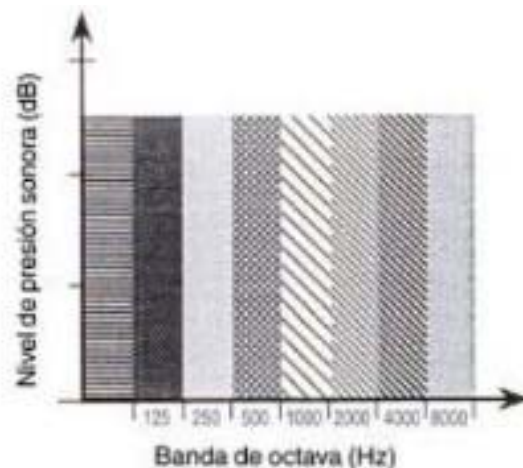


Figura 2.3: Representación del nivel de presión sonora del ruido rosa (bandas de octava) [21]

Debido a esta propiedad se emplea en la realización de diversas medidas acústicas como las destinadas a obtener el tiempo de reverberación de un recinto [22].

## 2.2 Conceptos sobre el *RT*

### 2.2.1 Definición de *RT*

Cuando una fuente sonora que emite en un espacio confinado interrumpe su actividad, aún permanece en el recinto un sonido residual que decrece con el tiempo. La persistencia de este sonido recibe el nombre de reverberación.

El tiempo de reverberación (*RT*) es la duración de ese sonido residual hasta que decae por debajo de la mínima intensidad audible partiendo de una intensidad inicial 1000000 veces mayor [23]. Este estándar proviene del desarrollo matemático que realizó el físico americano *W.C Sabine*, el cual observó también que la energía sonora en un recinto disminuía según una ley logarítmica.

Comúnmente se hace referencia al tiempo de reverberación como el tiempo que tarda el nivel de sonido en decaer 60 dB respecto al valor inicial que tenía la fuente sonora en el momento de su interrupción.

### 2.2.2 Curva energía-tiempo (*ETC*)

La reverberación se debe a las múltiples reflexiones del sonido entre las distintas superficies que conforman un recinto [24]. El comportamiento de estas reflexiones, así como la interacción con los materiales que conforman la sala, depende de la frecuencia [25].

El nivel energético (en unidades logarítmicas) de esas reflexiones en un punto de la sala en función del tiempo se representa a través de la curva energía-tiempo (*ETC*). Esta curva puede interpretarse como la respuesta de un recinto a un impulso sonoro [26]. Además, debido a la naturaleza de los fenómenos de reflexión previamente comentados, obtendremos una *ETC* distinta para cada banda de frecuencias analizada.

La información que muestra esta curva es útil para conocer el tiempo de reverberación de un recinto que, tal y como se desprende de lo citado anteriormente, dependerá generalmente de la frecuencia y del punto de la sala evaluado. Puesto que el decaimiento sonoro sigue una ley logarítmica, la curva energía-tiempo, en el caso ideal, sería una línea recta aunque en la realidad no siempre será así [27] [28] [29].

A continuación se muestra un ejemplo de *ETC* proporcionada por un programa de simulación.



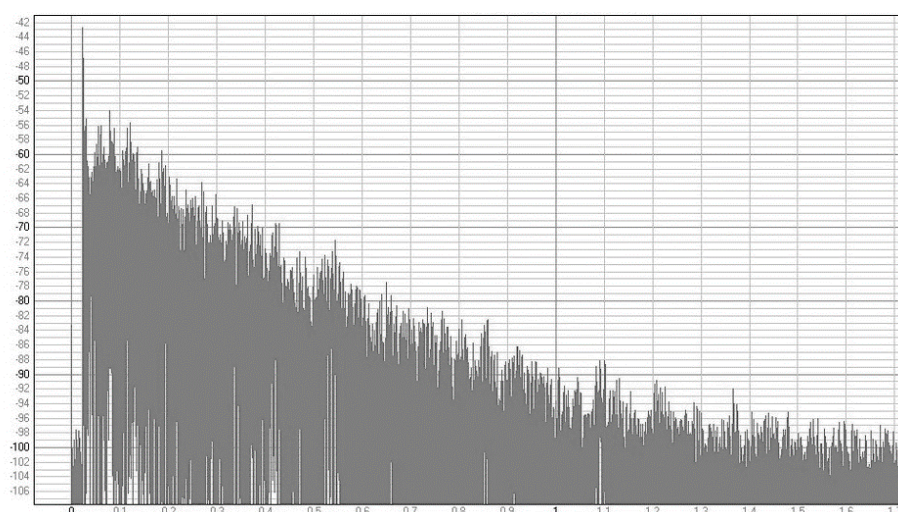


Figura 2.4: Ejemplo de curva *ETC* (energía sonora en función del tiempo) [30]

### 2.2.3 Integración de *Schröder*

La precisión con la que el tiempo de reverberación puede ser determinado a través de la *ETC* está limitado a la aleatoriedad que presentan estos decaimientos [31]. Con el fin de minimizar el efecto de estas fluctuaciones es conveniente promediar distintas realizaciones de estas curvas, sin embargo, esto es un método ineficiente.

*M.R. Schröder* demostró que de una única *ETC* se puede calcular una curva de decaimiento idéntica a la resultante de un promedio de infinitas realizaciones [31]. Matemáticamente corresponde a:

$$R(t) = \int_t^{\infty} h^2(t) dt \quad [2-9]$$

$h^2(t)$ : respuesta al impulso cuadrática

Puesto que el límite inferior supone un problema [32] se realiza la integración inversa. En la práctica se integra la energía asociada a la curva *ETC* desde el final de la respuesta impulsiva hasta un instante  $t$ .

En ocasiones el valor de  $RT$  se extrae de la curva de *Schröder* calculando el tiempo para un determinado decaimiento sonoro (en dB) y efectuando una extrapolación [33]. Esto da lugar a los distintos parámetros del apartado siguiente.

### 2.2.4 Parámetros indicadores de $RT$

Cuando se realizan mediciones de tiempo de reverberación en un recinto sucede frecuentemente que el nivel de ruido de fondo impide obtener el margen dinámico requerido de 60 dB [34].

Bajo esas circunstancias es posible dar un resultado de tiempo de reverberación evaluando el decaimiento del sonido para un margen inferior y realizar una extrapolación.

A continuación se nombran los parámetros más interesantes:

a) EDT (Early Decay Time) y  $T_{10}$

El *EDT* evalúa el tiempo de decaimiento desde 0 dB (cese de la fuente sonora) hasta -10 dB [35]. El  $T_{10}$  en cambio mide ese tiempo en el rango comprendido entre -5 dB hasta -15 dB [36] [37]. El tiempo de ambos se extrapola (multiplicar por 6) para cumplir con la definición clásica del *RT*. Este indicador es especialmente de interés en recintos donde la palabra o la música son relevantes ya que la parte inicial del decaimiento contribuye a la percepción subjetiva del tiempo de reverberación [38].

b)  $T_{20}$

En este caso, la evaluación de la curva de caída debe empezar 5 dB por debajo del nivel inicial de presión sonora con un rango de 20 dB (por lo tanto hasta -25 dB). Se hace referencia a este parámetro en la norma de medición de absorción acústica en una cámara reverberante [39].

c)  $T_{30}$

El rango en esta ocasión empieza en -5 dB y acaba en -35 dB. El  $T_{30}$  sirve de utilidad en la norma de la medición de parámetros acústicos en recintos [22]. Además, varios artículos coinciden en señalar que es el parámetro más preciso para caracterizar el tiempo de reverberación [40].

En el caso ideal en el que el decaimiento de la energía sonora en un recinto tuviera el mismo comportamiento a lo largo de todo el tiempo de respuesta, la *ETC* sería una línea recta y no habría diferencias entre los valores de los diferentes parámetros enunciados [41].

## 2.2.5 Valores recomendados de *RT*

Como se mencionaba en la introducción del presente documento, el tiempo de reverberación afecta a otros parámetros como pueden ser los relacionados con la inteligibilidad de la palabra o los que repercuten en la calidad musical. Así pues, parece razonable determinar un valor o un margen de valores de *RT* según el uso de un recinto que permitan desarrollar la actividad con garantías acústicas. En el conjunto de normativas que regulan la construcción de edificios en España (CTE)



también aparecen los valores límite de tiempo de reverberación en función del tipo de espacio y su volumen [42].

Puesto que el tiempo de reverberación depende de la frecuencia es común hablar del  $RT_{mid}$  [43] con el objetivo de mostrar un valor representativo.

$$RT_{mid} = \frac{RT(a\ 500Hz) + RT(a\ 1000Hz)}{2} [s] \quad [2-10]$$

A continuación se muestran algunos ejemplos de  $RT_{mid}$  recomendados (según *M. Barron*).

<b>Función o uso</b>	<b><math>RT_{mid}</math> (s)</b>
Teatro	0,7 – 1,0
Música de cámara	1,4 – 1,7
Ópera	1,3 – 1,8
Música del Clasicismo	1,6 – 1,8
Música del Romanticismo	1,8 – 2,2
Música para órgano	>2,5

Tabla 2.1: Valores recomendados de  $RT_{mid}$  en función del uso [43]

## 2.3 Modelos acústicos

Cuando se procede a analizar el comportamiento acústico de una sala o estudiar algún parámetro concreto (en nuestro caso el  $RT$ ) se puede realizar desde diferentes perspectivas. A continuación se describen los modelos acústicos más importantes y la relevancia que tienen en la estimación del  $RT$ .

### 2.3.1 Modelo ondulatorio

Este modelo adopta el punto de vista de la acústica ondulatoria. Desde esta perspectiva, para ciertas frecuencias con relación a las medidas de un recinto, se producen fenómenos de resonancia provocados por ondas estacionarias dando lugar a la aparición de modos propios [44].

Cuando la densidad de modos es muy elevada a lo largo del eje frecuencial se produce un solapamiento de estos y su influencia puede considerarse despreciable. Esto ocurre a partir de la frecuencia de *Schröder* [45] dada por:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{RT}{V}} \text{ [Hz]} \quad [2-11]$$

$RT$ : tiempo de reverberación, en s  
 $V$ : volumen del recinto, en  $m^3$

De la anterior expresión se desprende que cuanto más grande es un recinto menor será  $f_c$  (siempre que el  $RT$  no sea muy elevado) y, por tanto, dispondremos de un mayor rango de frecuencias sin incidencia apreciable de estos modos propios.

### 2.3.2 Modelo estadístico

Este modelo considera la onda sonora como un rayo o partícula sonora que se desplaza a lo largo de un recinto reflejándose en las distintas superficies. No obstante, esta teoría asume que después de un gran número de reflexiones el campo sonoro se presenta difuso. Esto significa que en cualquier punto de la sala incide la misma intensidad sonora proveniente de todas las direcciones [46].

Con el fin de no apreciar la influencia de fenómenos de resonancia será necesario encontrarnos en una región frecuencial donde la densidad de modos propios sea elevada. Así pues, para poder aplicar conceptos estocásticos debe cumplirse lo siguiente [47] [48] [49]:

$$f > f_s = 2000 \sqrt{\frac{RT}{V}} \text{ [Hz]} \quad [2-12]$$

$f_s$ : frecuencia de corte de Schröder

$RT$ : tiempo de reverberación, en s

$V$ : volumen del recinto, en  $m^3$

Las formulaciones clásicas, entre ellas la de *Sabine* y *Eyring* que veremos en el apartado 2.4, se basan en esta teoría.

### 2.3.3 Modelo geométrico

El modelo geométrico es una aproximación a la realidad que nos permite realizar un análisis acústico en un recinto cerrado. La principal asunción de esta teoría es que las ondas sonoras pueden entenderse como rayos o partículas que se propagan en diferentes direcciones, de forma análoga al tratamiento que recibe un rayo de luz en el campo de la óptica [50] [51].

Cuando las dimensiones globales de un recinto y de las superficies que lo conforman son grandes comparadas con la longitud de onda de la perturbación sonora es admisible modelar el sonido con los conceptos del modelo geométrico [52].

Aunque como se ha comentado anteriormente, para las frecuencias definidas por la expresión [2-12][2-11], el solapamiento de modos propios es elevado, algunos fenómenos ondulatorios no están perfectamente definidos y el tratamiento geométrico tiene que hacerse con precaución [53]. Es por eso que algunos autores [54] coinciden en señalar que es más acertado adoptar este modelo cuando se cumple:

$$f > 4f_s \text{ [Hz]} \quad [2-13]$$

$f_s$ : frecuencia de corte de Schröder

Bajo estas condiciones, cuando un rayo sonoro incide sobre una superficie se pueden producir dos tipos de reflexiones:

### a) Reflexión especular

Es aquella en que el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia.

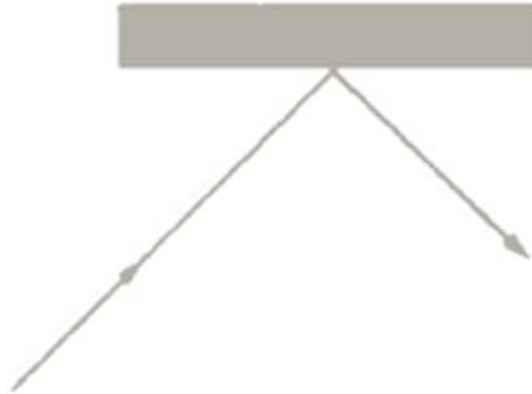


Figura 2.5: Ejemplo de reflexión especular de un rayo sonoro en una superficie [55]

Este efecto ocurre cuando la longitud de onda  $\lambda$  puede ser considerada pequeña en comparación con la dimensión de la superficie pero grande en relación con las irregularidades de la superficie (la superficie aparenta ser lisa respecto a la onda incidente) [56].

### b) Reflexión difusa (*scattering*)

Este efecto se produce cuando las irregularidades de la superficie son comparables a la longitud de la onda sonora  $\lambda$  [56], dispersando el rayo incidente en muchas direcciones. Este fenómeno no pertenece propiamente al modelo geométrico pero muchos *softwares* de simulación lo tienen en cuenta dada su relevancia en la predicción correcta del RT [57] [58]. No obstante, en la práctica no existen superficies que originen reflexiones totalmente difusas sino que parte de la energía se refleja también de forma especular [59] [60].

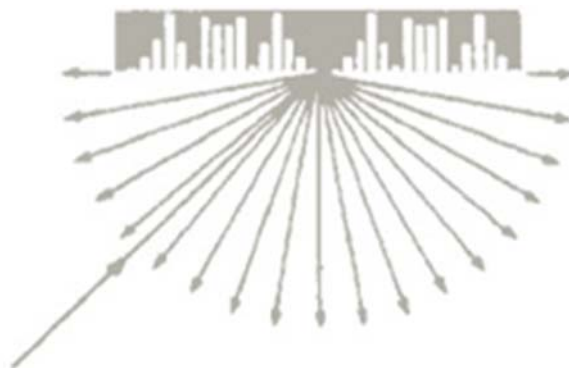


Figura 2.6: Ejemplo de reflexión difusa [55]

El *Ray Tracing* es un método implementado en muchas herramientas informáticas de simulación que está basado en el modelo geométrico.

Mediante el trazado de rayos se pueden calcular distintos parámetros, entre ellos el  $RT$ , evaluando en recepción el recorrido realizado y las contribuciones de nivel sonoro de cada uno de los rayos sonoros que emanan de la fuente. En el capítulo 3 se explica con más detenimiento analizando las herramientas de simulación *EASE* y *CATT*.

Cabe mencionar que tanto para el modelo estadístico como el geométrico, las diferentes partículas o rayos sonoros pueden ser considerados incoherentes (no están sujetos a interferencias) pudiéndose sumar sus energías. Además, en señales de banda ancha el análisis de frecuencias discretas es complicado por lo que el estudio de fases de las ondas sonoras (p. ej. interferencias constructivas y destructivas) puede considerarse despreciable [61].

## 2.4 Fórmulas clásicas de *RT*

*W.C. Sabine* fue pionero en el campo de la acústica de recintos desarrollando una de las fórmulas clásicas más conocidas. Dada su sencillez y facilidad de aplicación aún sigue utilizándose para predecir el tiempo de reverberación.

La referencia a la expresión de *Sabine* en ciertos documentos deja patente su importancia. Se hace mención, por ejemplo, en la norma UNE-EN ISO 354 [39] destinada a la medición de la absorción acústica en una cámara reverberante o las normas UNE-EN ISO 140 [62] que indican el procedimiento de medición del aislamiento en los edificios y de los elementos de construcción.

### 2.4.1 Absorción de los materiales

*Sabine* se dio cuenta que la energía sonora generada en un recinto era, en parte, absorbida por las superficies límite causando la disminución del tiempo de reverberación. Esa capacidad de absorción dependía de los materiales que conformaban la sala, concretamente, del área ( $m^2$ ) expuesta [63].

Puesto que sus experimentos los comenzó a realizar con cojines creyó necesario comparar esa absorción con la ofrecida por ventanas abiertas y así establecer una unidad estandarizada. Así pues, se define 1 Sabine como la absorción proporcionada por 1  $m^2$  de ventana abierta. De ahí surge la definición de coeficiente de absorción:

$$\alpha = \frac{1 \text{ Sabine}}{m^2} \quad [2-14]$$

Este último parámetro se puede entender como la energía absorbida respecto a la energía incidente y depende de la frecuencia considerada [64]. También depende del ángulo de incidencia [65] [66] pero el valor de  $\alpha$ , al medirse en campo difuso según la UNE-EN ISO 354 [39], se obtiene para una incidencia aleatoria o sea energía que proviene de todas las direcciones.

La tabla siguiente muestra los coeficientes de absorción de algunos materiales que podemos encontrar en un recinto, por bandas de octava.

Material	Frecuencias centrales bandas de octava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Ladrillo	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07
Bloque cemento (pintado)	0,10	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Suelo de cemento/terrazo	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Suelo de madera	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Panel de vidrio sellado ¼"	0,05	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02
Panel de madera ¼"	0,58	0,22	0,07	0,04	0,03	0,07
Butacas poco tapizadas (vacías)	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

Tabla 2.2: Valores de coeficientes de absorción de distintos materiales (bandas de octava) [67]

Para calcular los  $m^2$  de absorción  $A$  de cada superficie simplemente es:

$$A = \alpha \cdot S \text{ [Sabins]} \quad [2-15]$$

$\alpha$ : coeficiente de absorción del material, en Sabins/ $m^2$

$S$ : área de la superficie, en  $m^2$

## 2.4.2 Libre camino medio

Desde el punto de vista del modelo estadístico podemos entender la propagación de una onda acústica en un recinto como una partícula sonora que avanza por la sala hasta topar con una superficie y, después de verse reflejada, continuar en otra dirección hasta chocar con otra [68] [69].

*Sabine* pensaba que las distancias más largas que el sonido recorrería compensarían otras de menor longitud por lo que existiría un promedio, un libre camino medio [70]. La expresión de este camino medio viene dada por:

$$l_c = 4V/S \text{ [m]} \quad [2-16]$$

$V$ : volumen del recinto, en  $m^3$

$S$ : área total de las superficies límite del recinto, en  $m^2$

Asimismo, el libre tiempo medio o el tiempo entre reflexiones consecutivas es:

$$t_m = 4V/cS \text{ [s]} \quad [2-17]$$

$V$ : volumen del recinto, en  $m^3$

$S$ : área total de las superficies límite del recinto, en  $m^2$

$c$ : velocidad de propagación del sonido

De lo anterior se extrae que la frecuencia de reflexiones o el número de reflexiones por segundo es sencillamente  $1/t_m$ .

### 2.4.3 Formulaci3n de Sabine

El autor de la f3rmula comprob3 experimentalmente que el decaimiento de la intensidad sonora en un recinto se debí a la absorci3n de los materiales [71]. En base a esa teorí y usando el concepto del libre tiempo medio estableci3 la cantidad de energí en una sala en un instante de tiempo como la suma de energías de las distintas reflexiones sobre las superficies del recinto. La fracci3n de energí absorbida por una superficie viene dada por el factor  $\alpha$  (ver interpretaci3n de [2-14]). Por extensi3n,  $1-\alpha$  determina la energí restante. Así pues la energí total se puede expresar:

$$E(1-\alpha)^n \quad [2-18]$$

*E: energí inicial de la fuente sonora*

*n: orden de reflexi3n de la partícula sonora*

El valor de  $n$  contiene implícito un instante de tiempo  $t$ . Usando el concepto del libre tiempo medio es sencillamente:

$$t = nt_m \text{ [s]} \quad [2-19]$$

*n: orden de reflexi3n de la partícula sonora*

*$t_m$ : libre tiempo medio entre reflexiones, en s*

Puesto que no es objetivo de este trabajo, el desarrollo posterior se puede consultar en [72] [73] si resulta de interés.

La soluci3n resultante describe la caída del nivel sonoro en funci3n del tiempo. Así pues, si la evaluamos para un decaimiento de 60 dB obtenemos la expresi3n del tiempo de reverberaci3n de Sabine.

$$RT = 55,26 \frac{V}{cA} \text{ [s]} \quad [2-20]$$

*V: volumen del recinto, en  $m^3$*

*c: velocidad de propagaci3n del sonido*

*A: absorci3n total de las superficies del recinto, en Sabins*

Si consideramos una temperatura ambiente de 22 °C, teniendo en cuenta que la velocidad de propagaci3n varí segun [2-3] y la absorci3n sonora total del recinto corresponde a la suma de las absorciones de cada superficie, obtenemos la f3rmula siguiente:

$$RT = 0,16 \frac{V}{A} = 0,16 \frac{V}{\sum_{i=1}^n A_i} = 0,16 \frac{V}{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i} = 0,16 \frac{V}{\bar{\alpha} S} \text{ [s]} \quad [2-21]$$

*V: volumen del recinto, en  $m^3$*

*$A_i$ : absorci3n asociada a la superficie  $S_i$ , en Sabins*

*$\alpha_i$ : coeficiente de absorci3n acústica asociado a la superficie  $S_i$ , en Sabins/ $m^2$*

*S: área total de todas las superficies del recinto, en  $m^2$*

*$\bar{\alpha}$ : coeficiente medio de absorci3n ( $A/S$ ), en Sabins/ $m^2$*



La absorción adicional producida por el aire también es relevante y se determina mediante el coeficiente de atenuación  $m$ . Debido a la dependencia de este factor con la frecuencia la absorción del aire es más relevante para espacios grandes y frecuencias elevadas [74]. La expresión de *Sabine* teniendo en cuenta este aspecto es:

$$RT = 0,16 \frac{V}{\sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i S_i + 4mV} \text{ [s]} \quad [2-22]$$

$V$ : volumen del recinto, en  $m^3$

$\alpha_i$ : coeficiente de absorción acústica asociado a la superficie  $S_i$ , en Sabins/ $m^2$

$m$ : coeficiente de atenuación del aire, en  $m^{-1}$

Bajo ciertas condiciones existen expresiones analíticas que determinan el coeficiente  $m$  [74] aunque también es posible obtenerlo consultándolo en tablas [75]. Este aspecto es un tanto complejo puesto que la absorción del aire depende de propiedades como la humedad relativa, temperatura o presión atmosférica y escapa del alcance de este proyecto [76].

#### 2.4.4 Formulación de Eyring

Aunque esta fórmula también usa los conceptos del modelo estadístico *Eyring* observó que la ecuación de *Sabine* no era válida para recintos “apagados” (con mucha absorción). Además, realizó un planteamiento diferente asumiendo la sustitución de las paredes de una sala por fuentes-imagen [7] (ver [0]) y considerando un decaimiento escalonado de la energía sonora como consecuencia de las pérdidas en cada reflexión [77]. La expresión que *Eyring* derivó de sus razonamientos es la siguiente: (contiene la contribución de la absorción producida por el aire).

$$RT = \frac{55,26}{c} \frac{V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV} \text{ [s]} \quad [2-23]$$

$V$ : volumen del recinto, en  $m^3$

$c$ : velocidad de propagación del sonido

$S$ : área total de las superficies del recinto, en  $m^2$

$\bar{\alpha}$ : coeficiente medio de absorción, en Sabins/ $m^2$

$m$ : coeficiente de atenuación del aire, en  $m^{-1}$

#### 2.4.5 Limitaciones de la formulación clásica

Bajo las condiciones e hipótesis en las que *Sabine* desarrolló su fórmula observó que el decaimiento del sonido seguía, en promedio, una tendencia logarítmica. En un gráfico *ETC* correspondería a una línea recta [78]. Esto es un caso ideal derivado de la asunción que el campo sonoro es difuso en el recinto aunque en muchas ocasiones esto no sucede [79]. La ecuación

de *Eyring* presenta también limitaciones al basarse igualmente en la premisa de la existencia de un campo difuso [80].

Algunas situaciones en las que puede ser cuestionada la validez de estas fórmulas son:

a) Recintos con formas no regulares

Por ejemplo, la dimensión de un eje de un recinto mucho mayor que las otras [81] (p. ej. recinto alargado, estrecho y bajo). En este caso los caminos recorridos por el rayo sonoro se alejarían, probablemente, del libre camino medio.

b) Distribución no uniforme de la absorción acústica

La diferente absorción de las distintas superficies del recinto limita la existencia de un campo sonoro difuso [82].

c) Elevado coeficiente medio de absorción

Otra limitación de la fórmula de *Sabine* sucede para el caso extremo de  $\bar{\alpha}=1$ . El resultado da un valor diferente de cero cuando, en esta circunstancia, el tiempo de reverberación debería ser nulo. Cuanto mayor es la absorción más rápido decae el campo sonoro perdiendo la condición de difuso [83]. La ecuación de *Eyring*, en cambio, subsana esa deficiencia.

En ambas expresiones no se establece ninguna dependencia entre el *RT* y la ubicación del receptor en el recinto pero, de los comentarios anteriores, se extrae que los valores obtenidos no tienen por qué ser iguales a lo largo de la sala.

## 3 Simulación acústica. *EASE* y *CATT*

### 3.1 Métodos de simulación

Una de las formas más extendidas de estimar el tiempo de reverberación de un recinto es usando herramientas de simulación informática. Su popularidad reside en la practicidad y en el hecho de que, en ciertas circunstancias, se erige como el método más conveniente (ver 1.1, último párrafo).

#### 3.1.1 Requerimientos previos

Es importante confirmar que se cumplen las premisas de la teoría geométrica cuando se decide hacer uso de estos programas informáticos. De otro modo no se pueden garantizar la validez de los resultados debido a la influencia de fenómenos ondulatorios que estas herramientas no contemplan.

Un paso imprescindible para realizar una simulación acústica es disponer de un modelo 3D del recinto a analizar. Particularmente, *EASE* y *CATT* permiten elaborarlo a través de sus propias herramientas aunque también existe la opción de importar una sala diseñada con un programa de dibujo técnico asistido por ordenador como *AutoCAD* [84].

La correcta construcción de este modelo es importante y se deben respetar ciertas reglas respecto al dibujo de las superficies del recinto, algunas específicas de cada programa, para que el modelo creado pueda considerarse cerrado. Esto significa que no contenga excesivos errores que causen una elevada pérdida de rayos sonoros [85] que puedan comprometer la validez de los resultados de las simulaciones.

Antes de analizar los *softwares* objeto de estudio *EASE* y *CATT* se describen a continuación los dos modelos básicos que se apoyan en la teoría acústica geométrica y que muchos simuladores acústicos implementan en sus algoritmos de cálculo.

### 3.1.2 *Image Source o Mirror Image*

Este método se basa en el principio de que la reflexión especular de un rayo sonoro sobre una superficie que viaja desde una fuente hacia un receptor puede ser sustituida por el camino directo desde una fuente-imagen. Así pues, este modelo entiende las superficies límite como si fueran espejos.

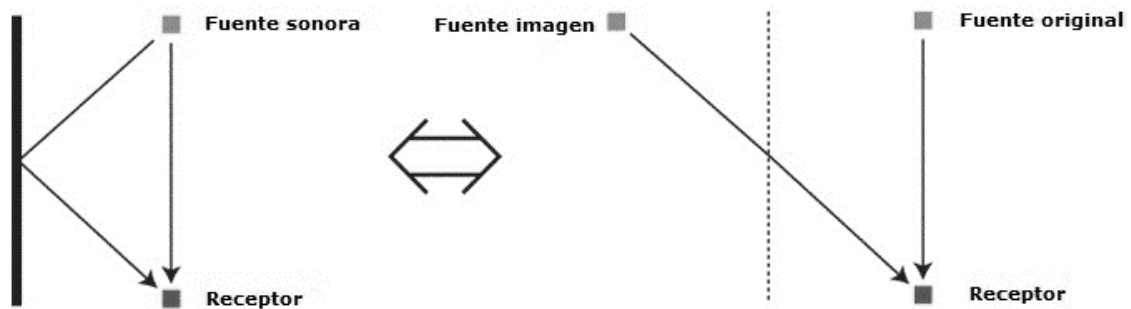


Figura 3.1: Fenómeno de reflexión (izda.) y modelo de fuente imagen (dcha.) [86]

Además debe comprobarse que tales fuentes-imagen son visibles desde el receptor con el fin de verificar que los caminos de reflexión existen [87]. En la figura siguiente pueden verse las situaciones de obstrucción de visibilidad.

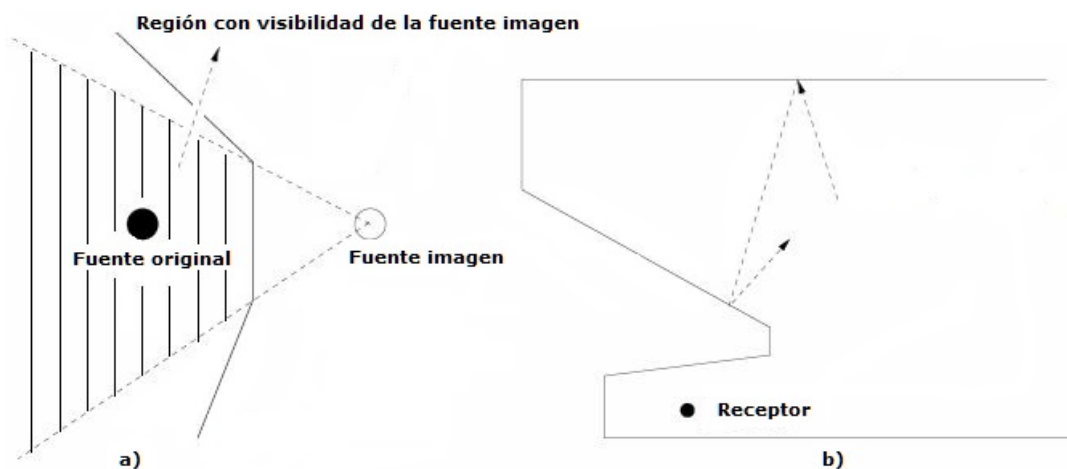


Figura 3.2: a) Receptor fuera de la región marcada, sin visibilidad. b) Existencia de obstáculos en el camino del rayo sonoro [88]

Este modelo se complica para órdenes de reflexiones elevados creciendo exponencialmente el número de fuentes-imagen requeridas. Asimismo, el coste computacional aumenta en la misma proporción [89] [90].

La misma dificultad aparece cuando la geometría de la sala es compleja [91] y/o contiene superficies convexas [87]. El dibujo de este tipo de superficies en el modelo de simulación correspondería a múltiples planos que, en las zonas de unión de estos, causarían efectos de difracción [92].

Por este motivo el modelo presenta limitaciones antes los fenómenos de dispersión o *scattering* [92] [93] [94].

De todo esto se puede extraer que el *Image Source* es un método adecuado para analizar salas regulares y reflexiones tempranas (reflexiones de orden bajo y puramente especulares) [95]. Dado que la contribución de las reflexiones tardías en el tiempo de reverberación es considerable, este método no es el preferido para la estimación del *RT* [96].

### 3.1.3 Ray Tracing

El concepto de este método consiste en representar la energía sonora de una fuente a través de un número finito de rayos que se emiten en distintas direcciones según la directividad de la fuente. Cada uno de estos rayos contiene una porción discreta del total de energía [97].

Estos rayos se mueven a la velocidad de propagación del sonido siguiendo el modelo de la acústica geométrica. Esto significa que cuando alcanzan una superficie adquieren una nueva dirección según las leyes de la reflexión especular.

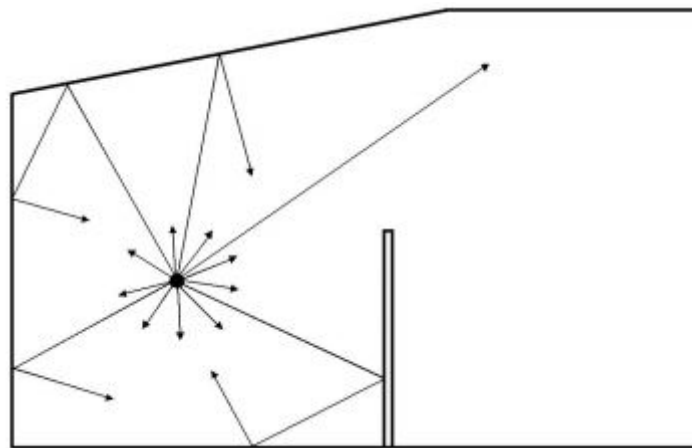


Figura 3.3: Representación del método *Ray Tracing* [98]

Cada vez que un rayo impacta sobre una superficie decrece su nivel energético de acuerdo al coeficiente de absorción  $\alpha$ . Además también disminuirá debido a la absorción del aire [99] según el coeficiente de atenuación  $m$  (ver [2.4.3]) y la distancia recorrida por el rayo.

Contrariamente a lo que sucede con el *Image Source* este método sí que contempla reflexiones difusas, las cuales se modelan a través de un coeficiente de *scattering* con valores comprendidos entre 0 y 1 (0 corresponde a una reflexión totalmente especular). Esta dispersión puede ser aplicada mediante una función de *scattering* que determina un ángulo

de salida de la reflexión, o bien, de forma determinista dividiendo el rayo incidente en múltiples rayos. La primera opción es más fácil de implementar siguiendo la función de *Lambert* aunque conduce a resultados más aleatorios. La segunda opción lleva a tiempos de cálculo elevados [100] [101]. Además, en algunos algoritmos este coeficiente puede entenderse como una probabilidad de que suceda una reflexión difusa [102], así que se deduce que el método *Ray Tracing* tiene un componente estocástico evidente.

Esta naturaleza también se puede observar en el proceso de detección de los rayos en el punto de recepción a evaluar, el cual se modela a través de un volumen (usualmente una esfera) aunque esto puede conducir a errores [103] [104]. Los rayos que alcanzan el receptor se clasifican según la energía que tienen en el instante del impacto y del tiempo de llegada que depende del camino recorrido. Nótese otra vez la esencia estadística de este modelo entendido como aleatorias porciones de energía que llegan a un punto en sucesivos intervalos de tiempo [97].

La información obtenida de los diferentes rayos permite la elaboración de histogramas para cada punto de evaluación. En base a estos resultados podemos estimar el valor del tiempo de reverberación.

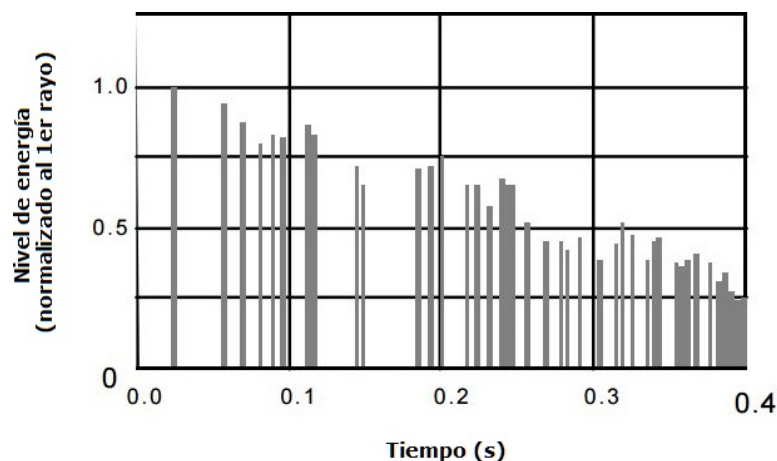


Figura 3.4: Representación de la llegada de los distintos rayos en función del tiempo y sus energías relativas [105]

Por último mencionar que algunos simuladores acústicos permiten seleccionar diferentes parámetros que limitan el número de rayos generados, así como el tiempo de vida de los mismos, estableciendo un orden máximo de reflexión, decaimiento de niveles de energía máximos, etc.

## 3.2 Enhanced Acoustic Simulator for Engineers (EASE)

*EASE* es un *software* de simulación acústica que permite la estimación de diferentes parámetros (entre ellos el *RT*). Está formado por módulos que son llamados desde el programa principal para llevar a cabo distintas tareas. Aunque estos módulos están enlazados algunos de ellos funcionan separadamente. La versión analizada en este trabajo es la 4.0. La interfaz del programa principal tiene este aspecto:

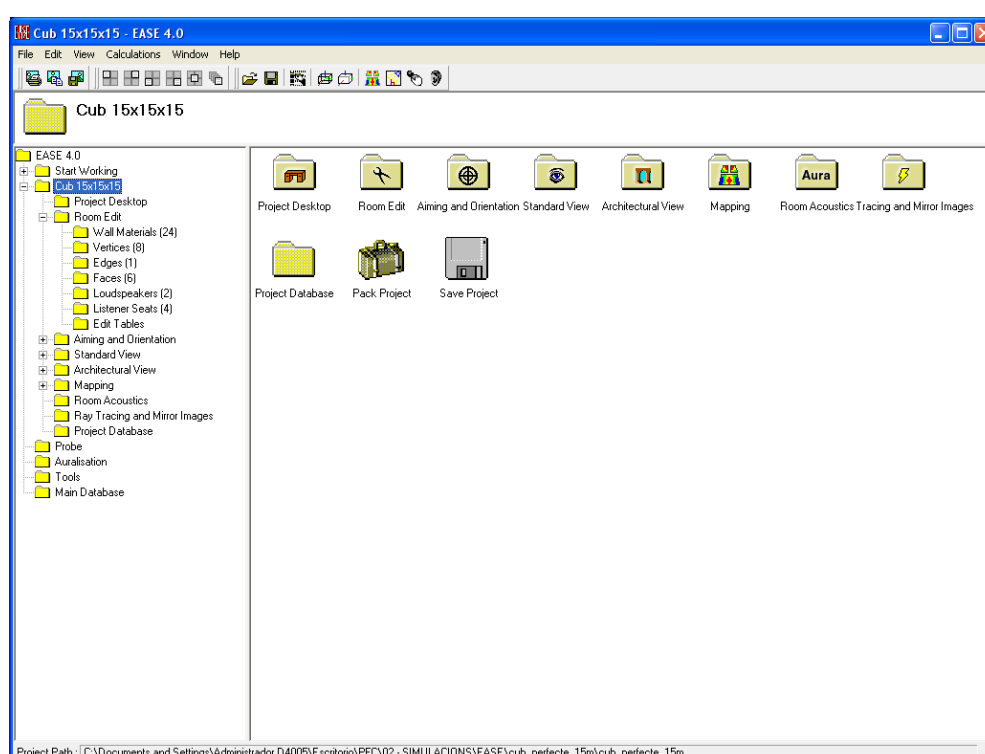


Figura 3.5: Interfaz de la ventana principal de *EASE*

Puesto que en este proyecto pretendemos investigar el tiempo de reverberación se describen a continuación los distintos métodos de *EASE* con los que se puede estimar este parámetro.

### 3.2.1 Room RT y Room Data

Esta opción permite inspeccionar los valores del tiempo de reverberación del recinto por tercio de octava obtenidos de las fórmulas clásicas de *Sabine* o de *Eyring* (según la selección). La absorción del aire se calcula internamente a partir de los datos atmosféricos mostrados en la ventana (modificables por el usuario).

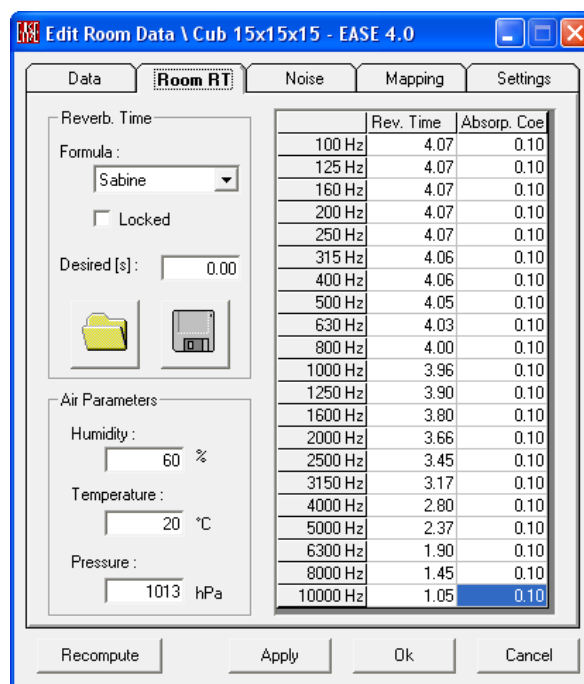


Figura 3.6: Información de *Sabine/Eyring* y condiciones ambientales en *Room RT*

Para hallar el resultado de las expresiones clásicas el programa se abastece de los coeficientes de absorción que se introducen en el programa y de los datos calculados referentes a la geometría del modelo creado.

*EASE* también tiene la opción de mostrar los datos estadísticos relativos al modelo del recinto junto a un gráfico de *RT* (*Sabine* o *Eyring*).

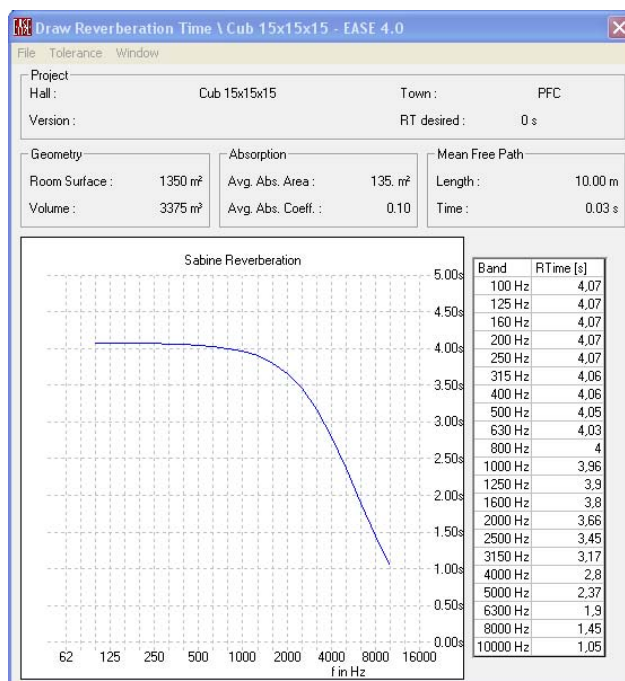


Figura 3.7: Datos del recinto, camino y tiempo libre medios y gráfico de *RT*



Conocer los valores del libre camino y tiempo medios nos resultará útil para ajustar parámetros de cálculo de los métodos que se describirán más adelante.

### 3.2.2 Local Decay Time

Mediante esta opción *EASE* proporciona una rápida evaluación del tiempo de reverberación usando una técnica basada en *Ray Tracing* [106]. Este método no necesita de la definición de ninguna fuente de excitación puesto que genera un patrón omnidireccional [107] para distribuir los rayos sonoros por todo el recinto desde el punto o puntos de recepción que hayamos seleccionado. La rutina generará desde estas posiciones un número de rayos determinado y contabilizará la energía e información asociada al tiempo de cada uno, hasta una disminución energética de 60 dB. Los datos de todos los rayos sirven para obtener un promedio que permite calcular el tiempo de decaimiento [106].

Las opciones seleccionables en este método se muestran a continuación.

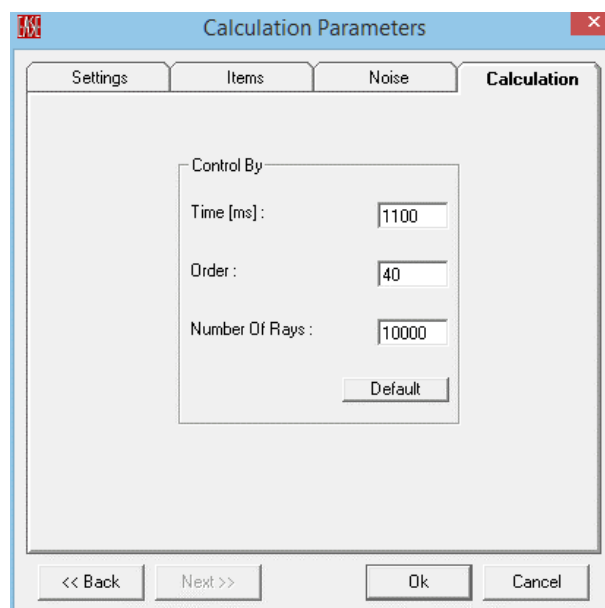


Figura 3.8: Parámetros de control del *Local Decay Time* de *EASE*

Así pues se puede ajustar la cantidad de rayos con la que se modela la emisión de la fuente sonora, el número de reflexiones y el tiempo de vida máximos que el programa simulará para cada rayo. Estos dos parámetros deben introducirse coherentemente teniendo en cuenta la relación que existe entre ellos, de lo contrario, *EASE* nos mostrará una advertencia. Una buena aproximación es utilizar el valor estadístico del libre tiempo medio recorrido mostrado en la Figura 3.7. De tal forma que:

$$Time = 1000.(nt_m) [ms] \quad [3-1]$$

$n$ : parámetro Order de la Figura 3.8

$t_m$ : libre tiempo medio (se puede obtener de la Figura 3.7)

Cuanto mayor sea el número de rayos utilizados para la fuente (más información a promediar) se presupone una mayor precisión en el  $RT$  obtenido [107]. Asimismo,  $Time$  y  $Order$  deberán ser tales que correspondan a una ventana temporal suficientemente representativa del decaimiento sonoro de la sala. En el caso ideal ese tiempo será el tiempo de reverberación esperado.

Este método presenta los resultados en una tabla, gráficamente o de ambas formas, pudiendo consultar los valores de  $RT$  en función de la frecuencia (tercios de octava) y de las posiciones seleccionadas anteriormente.

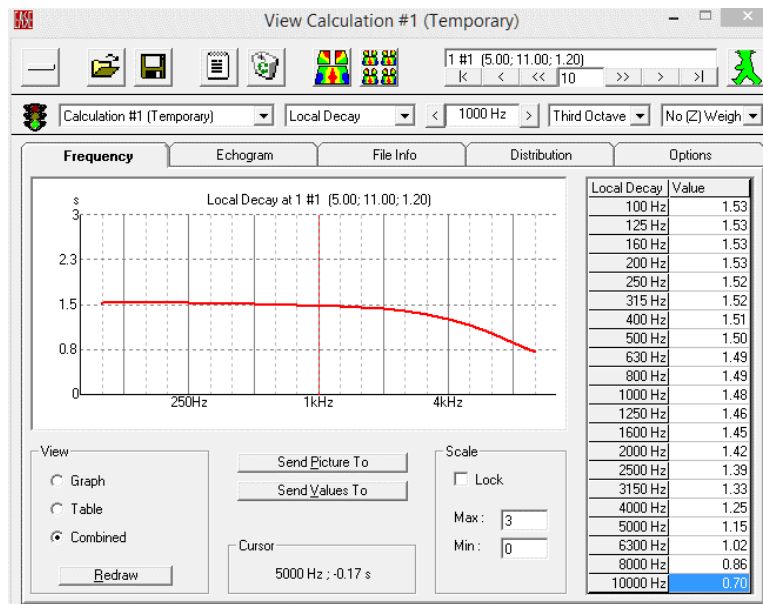


Figura 3.9: Presentación de resultados del *Local Decay Time*

### 3.2.3 Local Ray Tracing (Ray Tracing Impacts)

El *Ray Tracing Impacts* es un algoritmo de *EASE* al que se puede acceder de forma directa a través del módulo *Ray Tracing* o bien a través de la opción *Local Ray Tracing* (también tenemos la posibilidad de elegir el método *Mirror Image Impacts*). La principal diferencia entre las dos formas de acceso al algoritmo es puramente funcional. A través del *Local Ray Tracing* únicamente podemos evaluar un punto de recepción por simulación mientras que si accedemos a la opción *Ray Tracing Impacts* directamente se pueden evaluar varias posiciones en una misma ejecución, acceder a la

visualización del camino de los rayos simulados y generar archivos de impacto de los puntos bajo análisis.

En lo referido al funcionamiento del algoritmo este se basa en *Ray Tracing* y registra los rayos que inciden en una esfera que rodea en 1 metro los puntos de recepción seleccionados [108]. En combinación con esta información y con el objetivo de identificar el impacto sobre el centro de la esfera (receptor) se ejecuta una rutina de *Mirror Image* [109].

Las ventanas de ajustes de cálculo según si se accede a través del *Local Ray Tracing* o bien mediante la opción *Ray Tracing Impacts* son estas:

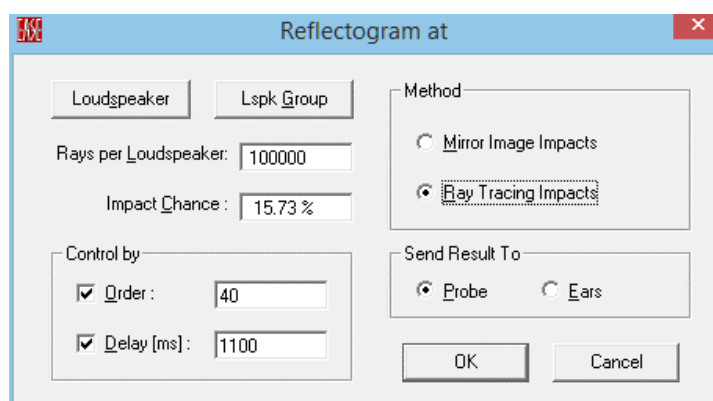


Figura 3.10: Ventana de opciones de cálculo del *Local Ray Tracing* (2 métodos seleccionables: *Ray Tracing Impacts* y *Mirror Image Impacts*)

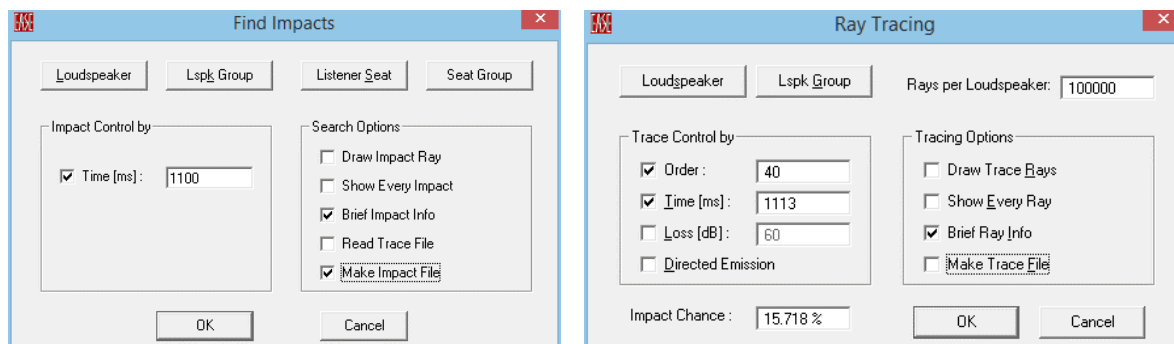


Figura 3.11: Opciones del *Ray Tracing Impacts* (la ventana izq. aparece primero)

En general aparecen las mismas opciones que en el *Local Decay Time* aunque en el caso del acceso por *Ray Tracing Impacts* (Figura 3.11) nos aparecerá en primer lugar la ventana de la izquierda que corresponde al método de detección y después la de la derecha que hace referencia a la rutina de *Ray Tracing*. En esa última ventana tenemos el parámetro de control *Loss [dB]* que filtra los rayos cuya energía ha disminuido un cierto valor en dB. Las opciones *Directed Emission*, así como los seleccionables de la parte derecha de las ventanas, no son relevantes al tener que ver con la visualización e información de los rayos y gestión de distintos archivos.

Los parámetros *Order* y *Time* (llamado *Delay* en el *Local Ray Tracing*) son los habituales (se puede aplicar el mismo criterio de [3-1]). Destacar que el *Time* de la ventana izquierda de la Figura 3.11 se contabiliza a partir del primer impacto sobre el receptor mientras que el tiempo de la derecha se computa desde que el rayo es generado por la fuente (ese valor aparece calculado de forma automática). En esta ocasión la relación de *Order* y *Time*, junto al número de rayos de la fuente (*Rays*), determinan un nuevo indicador: *Impact Chance* [110]. Este último concepto advierte de la naturaleza estocástica del trazado de rayos, tal y como se explica en 3.1.3. Nótese en las figuras anteriores el elevado número de rayos necesarios para una alta probabilidad de impacto.

Una vez finalizada la simulación se presenta el resultado. En el *Local Ray Tracing* se muestra automáticamente. Directamente a través del *Ray Tracing Impacts* deberemos hacer clic sobre *Invoke Probe*. El gráfico mostrado es un reflectograma que puede interpretarse como una *ETC* [2.2.2] pudiendo inspeccionar los valores de *RT* en una pestaña de opciones y también los de *Sabine/Eyring*. Además también es posible calcular el tiempo de reverberación mediante el método de *Schröder* [2.2.3].

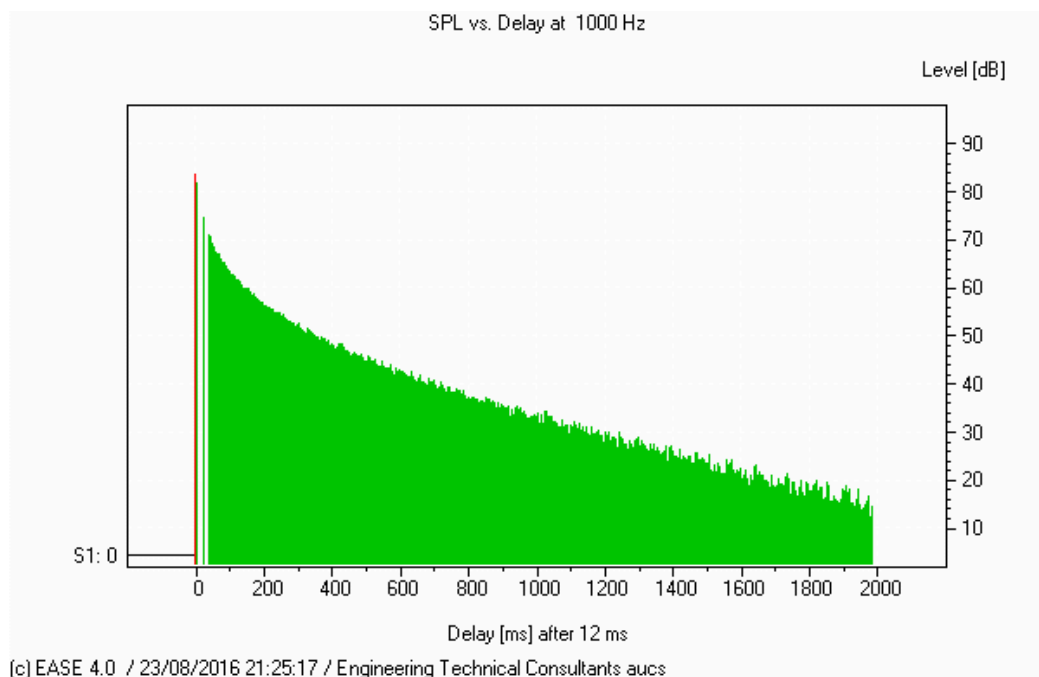


Figura 3.12: Reflectograma asociado al método *Local Ray Tracing* de *EASE*

Para ajustar el cálculo de *Schröder* también hay algunas opciones que nos permiten definir la ventana temporal sobre la que queremos aplicar el método así como añadir la información energética del decaimiento de la cola reverberante o de las reflexiones que se encuentren fuera del margen de tiempo definido [111].

### 3.2.4 Local Ray Tracing (Mirror Image Impacts)

El *Mirror Image Impacts* es accesible a través de la opción *Local Ray Tracing* (Figura 3.10) o de forma directa.

El algoritmo utilizado en esta rutina está basado en *Image Source*. Como se explica en [0] este modelo es determinista. Únicamente se buscan los caminos que encuentran al receptor mediante la creación de una cantidad de fuentes-espejo virtuales que dependen del *Order* seleccionado. Por tanto, no aplica ningún parámetro relacionado con el número de rayos ni la probabilidad de impacto. La ventana de opciones que nos encontramos en este caso es la siguiente:

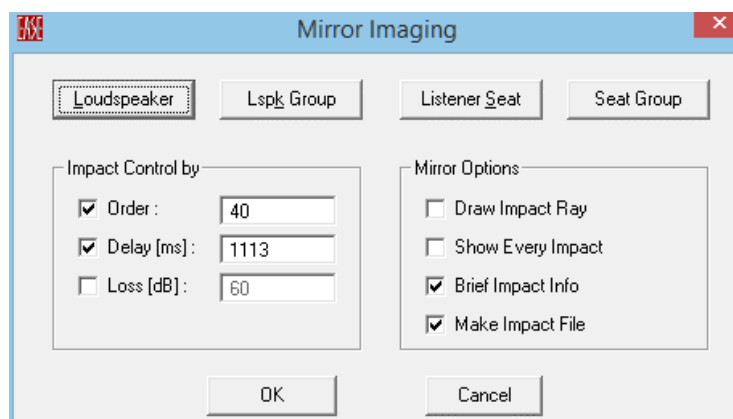


Figura 3.13: Opciones de cálculo del *Mirror Image Impacts*

Accediendo a través del *Local Ray Tracing* (Figura 3.10) no aparece el ajuste *Loss [dB]* explicado en el anterior apartado ni los seleccionables que tienen que ver con la visualización y gestión de archivos. Además, únicamente podremos inspeccionar el resultado de una única posición de recepción por simulación.

Por último conviene recordar que con este algoritmo se presuponen tiempos de simulación elevados para órdenes de reflexión grandes ( $n > 10$ ) o recintos con muchas superficies ( $> 40$ ) [109].

### 3.2.5 Analysis Utility for Room Acoustics (AURA)

*AURA* es un módulo perteneciente a *EASE* basado en el algoritmo *CAESAR* [112] y que permite el cálculo de varios parámetros acústicos, entre ellos el tiempo de reverberación mediante el *EDT*,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  o  $T_{30}$  [2.2.4].

Este método reduce significativamente la carga computacional requerida en comparación con los métodos de *Image Source* y *Ray Tracing* que, debido a los elevados tiempos de simulación (sobre todo el primero), son adecuados para ventanas de tiempo no muy grandes. En algunos casos incluso se añade información estadística para tratar procesos de reverberación [113].

El algoritmo *AURA* realiza una combinación de los dos métodos. La transición entre ambos se efectúa para cierto orden fijado. Se utiliza un modelo de *Image Source* para las reflexiones tempranas (bajo orden) mientras que el *Ray Tracing* se aplica para reflexiones tardías y las de carácter dispersivo. Así pues el algoritmo tiene en cuenta fenómenos de difusión. Además, para reducir el coste computacional, se usa un modelo de generación de rejillas o cuadrículas a lo largo del espacio que permiten restringir el volumen del espacio y monitorizar los rayos o partículas sonoras implicados de forma más eficiente [114] [115].

El algoritmo *AURA* adquiere la naturaleza estocástica del *Ray Tracing* ya que la fuente sonora genera partículas sonoras en direcciones aleatorias con una cantidad de energía concreta. Cuando estas partículas chocan contra una superficie del modelo se atenúan de acuerdo con las propiedades de absorción de los materiales definidos y toman una nueva dirección según las leyes de la reflexión. Se asume que las pérdidas asociadas a la propagación se contabilizan indirectamente debido a la baja probabilidad de detectar una partícula sonora en un punto receptor al incrementarse las distancias implicadas [116].

A continuación se muestran los ajustes de cálculo de *AURA*, una vez seleccionada la fuente sonora y elegidos los puntos de evaluación *Listener Seats*. La ventana de la Figura 3.14 corresponde a la versión de *EASE 4.0*. Versiones posteriores incorporan ligeros cambios tanto en lo visual como en las opciones disponibles [117].

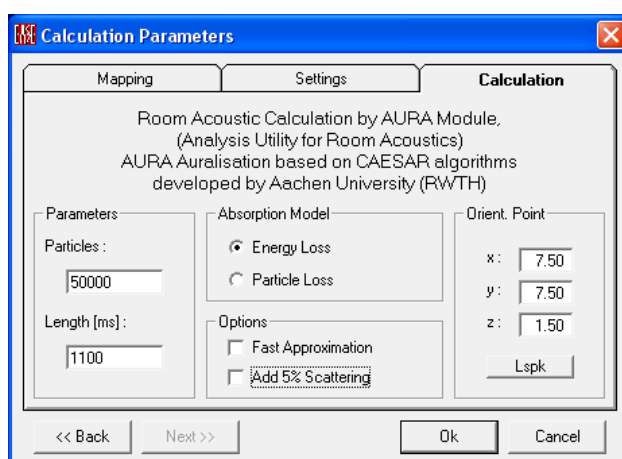


Figura 3.14: Parámetros de cálculo de AURA de EASE 4.0

El parámetro *Particles* hace referencia al número de elementos energéticos con el que se modela la fuente sonora (análogamente a lo que ocurre con los rayos sonoros del *Ray Tracing*).

La ventana temporal de inspección viene determinada por *Length [ms]*. El mínimo valor según EASE debería ser aproximadamente 2/3 del tiempo de reverberación esperado.

Además se pueden seleccionar dos formas distintas de gestión de la energía de la partícula sonora al incidir sobre las diferentes superficies. *Energy Loss* sigue el modelo de absorción en el que en cada reflexión el nivel decae según el coeficiente  $\alpha$  del material. Por el contrario, *Particle Loss* genera un número aleatorio entre 0 y 1 que, comparado con el valor de  $\alpha$ , determina si la partícula sonora se extingue o continúa su camino sin pérdida de energía [118].

Una de las características que incorpora esta rutina es la inclusión de *scattering* en las simulaciones a través de un coeficiente definido en las propiedades de los materiales (las anteriores no tienen en cuenta fenómenos dispersivos en los cálculos) [119]. Si no se ha incluido esa información se puede marcar un 5% de difusión por defecto para todas las reflexiones (en versiones posteriores este valor es un 10% ya que se considera una aproximación más realista [120]). El algoritmo incluye este fenómeno de un modo estocástico. Cuando una partícula sonora choca contra una superficie, además de disminuir su energía en base al coeficiente de absorción del material, se genera un número aleatorio que comparado con el valor de *scattering* determina si la partícula se refleja de forma especular o difusa con un ángulo de salida aleatorio basado en la distribución de *Lambert* [121] [122].

La opción *Fast Approximation* es únicamente relevante cuando se utilizan librerías de altavoces. No aplica en nuestro caso [120].

La presentación de resultados del tiempo de reverberación es prácticamente igual a la del *Local Decay Time* con la salvedad de que el *RT* viene dado por los indicadores *EDT*,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  o  $T_{30}$ . Estos parámetros se obtienen en base al método de *Schröder*.

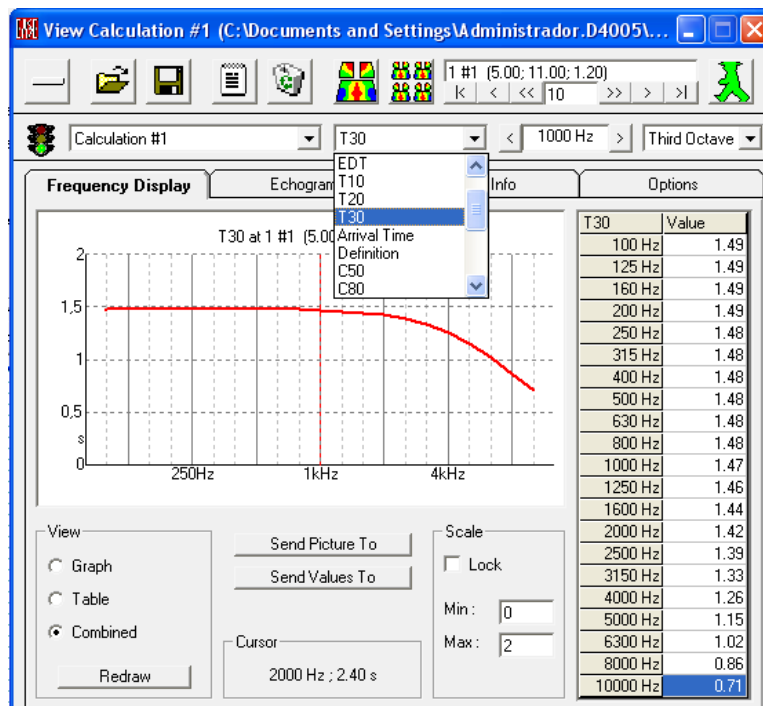


Figura 3.15: Valores de *RT* (*EDT*,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ) y representación gráfica de *AURA*

Seleccionando la pestaña *Echogram* también tenemos acceso a la visualización del decaimiento sonoro (en dB) en función del tiempo, así como la posibilidad de visualizar la recta ajustada al cálculo de *Schröder*.



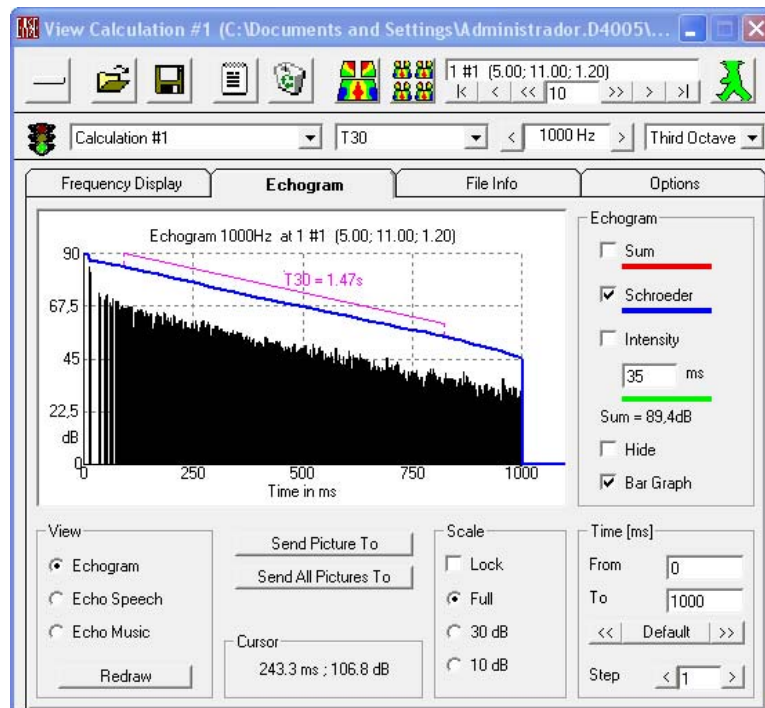


Figura 3.16: Representación del decaimiento sonoro y cálculo de *Schröder* de AURA

Un ecograma difiere de un reflectograma (representación de la energía sonora de las reflexiones a lo largo del tiempo) en que el primero almacena la energía de las reflexiones en *bins* de, habitualmente, 1 ms de ancho mientras que el reflectograma guarda las informaciones de cada reflexión sin agruparlas en “cajas” temporales [123].

### 3.3 Computer Aided Theater Technique (CATT)

Esta herramienta de simulación también permite la estimación del  $RT$  de una sala. Está compuesta por el programa *CATT v9.0b* desde el cual pueden ejecutarse otros subprogramas que llevarán a cabo distintas funciones (el más importante para nuestro propósito es *TUCT v1.0h*). La Figura 3.17 muestra el aspecto de la interfaz de usuario.

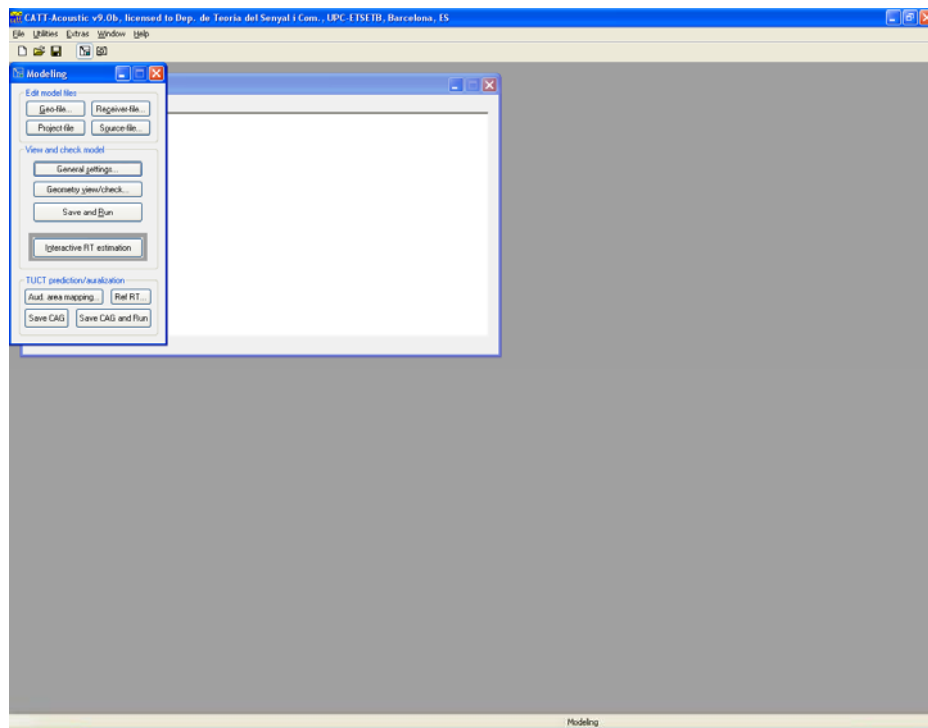


Figura 3.17: Ventana principal de *CATT*

La función principal de *CATT* es gestionar y permitir la edición de los archivos que contienen información de la geometría del recinto, las fuentes sonoras a utilizar y los puntos de recepción sobre los que evaluar los parámetros acústicos. Estos datos permiten generar el modelo a simular. También se pueden ajustar algunas opciones como la consideración o no de difusión en las superficies o la estimación de la absorción del aire.

*CATT* permite elaborar el modelo de la sala explicitando, en el archivo correspondiente, las coordenadas de los planos y las propiedades acústicas de los materiales (coeficientes de absorción y difusión) siguiendo una cierta estructura. No posee un entorno gráfico como sucede en *EASE* pero resulta más flexible puesto que pueden definirse variables como si se tratara de un lenguaje de programación [124]. De todas formas también es posible importar un dibujo realizado con *AutoCAD* [84] [125].

Las simulaciones acústicas y la presentación de resultados son llevadas a cabo por el programa *The Universal Cone-Tracer (TUCT)*. A continuación se describe la filosofía de su funcionamiento así como los distintos métodos disponibles en *CATT/TUCT* que permiten estimar el *RT*.

### 3.3.1 The Universal Cone Tracer (TUCT)

El algoritmo principal del *TUCT* está basado en una variante del *Ray Tracing* donde rayos adyacentes conforman conos [126]. Puesto que los rayos divergen al propagarse, el cono se va ensanchando. Con este método el tiempo computacional se reduce aunque la dificultad para modelar una fuente sonora omnidireccional requiere una correcta implementación [127]. En el caso que los rayos adyacentes impacten sobre distintas superficies, el cono incidente se divide en dos nuevos. La detección de un receptor en este caso se lleva a cabo cuando este se encuentra dentro del cono [128].

Concretamente, el algoritmo que utiliza *TUCT* es el método *Randomised Tail-corrected Cone tracing (RTC)* basado en *Cone Tracing* y que combina *Ray Tracing* y *Image Source* [129].

En el programa existen diferentes variantes del algoritmo según la precisión o el cálculo requerido. Aunque todas contemplan reflexiones especulares y difusas, la principal diferencia es el tratamiento determinista o aleatorio que reciben. A continuación se describen los 2 posibles casos:

#### a) Tratamiento determinista

En esta situación un rayo que incide en una superficie produce una reflexión conformada por una parte especular y, por otro lado, una parte difusa que da lugar a la generación de múltiples rayos. La energía de cada uno de ellos viene dada por la función de *Lambert* [100]. El porcentaje que determina la contribución especular y difusa se determina mediante los coeficientes  $\alpha$  y  $s$ .

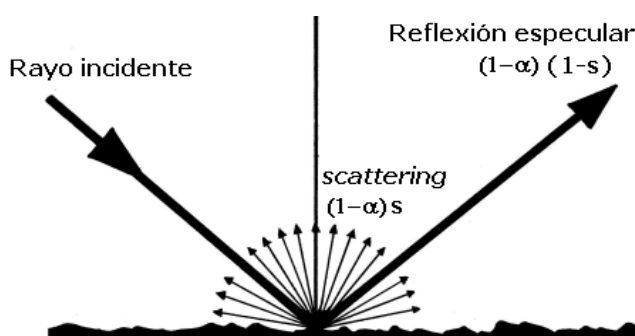


Figura 3.18: Representación de reflexiones del *RTC* (caso determinista) [130]

Realmente la implementación es más compleja. Las superficies que producen difusión son modeladas en subregiones y, cuando un rayo incide en alguna de ellas, actúan como una fuente de sonido secundaria de la que emanan nuevos rayos (*scattering*) [121] [131] [132] [133]. La combinación de esta técnica junto con el método de *Image Source* da lugar al modelo de detección de la siguiente figura [134]. Además, el hecho de utilizar *Cone Tracing* incrementa la eficiencia de encontrar fuentes imagen válidas [135].

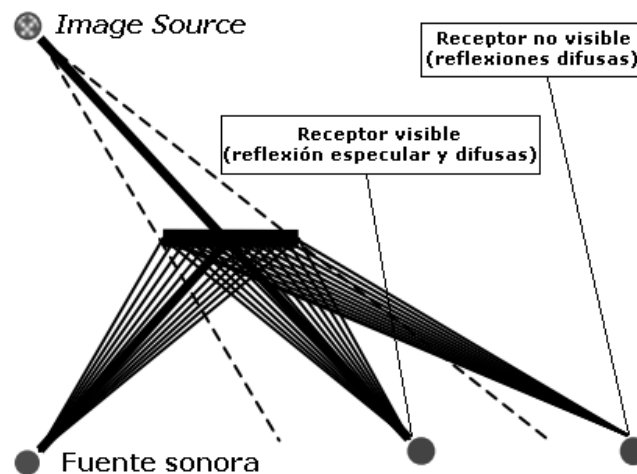


Figura 3.19: Representación de la combinación del método *Image Source* y *RTC* (reflexión especular y difusas para distintos receptores) [121]

#### b) Tratamiento estocástico

En este caso las reflexiones difusas son simuladas por métodos estadísticos. Al incidir un rayo sobre una superficie el método genera un número aleatorio entre 0 y 1. Si el valor resultante es mayor que el coeficiente de *scattering* (*s*) se producirá una reflexión especular, de lo contrario será difusa [136], tomando una nueva dirección de salida dada por la función de *Lambert* según el resultado de dos nuevos números aleatorios [137] [138].

### 3.3.2 Interactive RT estimation (CATT)

Este método se puede ejecutar sin hacer uso del programa *TUCT* y sirve para visualizar numérica y gráficamente el *RT* de *Sabine* y *Eyring* para las bandas de octava comprendidas entre 125 Hz y 16 kHz. Se muestra también el valor del  $T_{mf}$  que se obtiene de la siguiente forma:

$$T_{mf} = \frac{RT(500\text{ Hz}) + RT(1\text{ kHz}) + RT(2\text{ kHz})}{3} \quad [3-2]$$

Mediante *Start Trace* se inicia una rutina que permite estimar un  $T_{30}$  global (no asociado a ningún punto concreto de la sala) y verlo representado junto a las anteriores fórmulas clásicas.

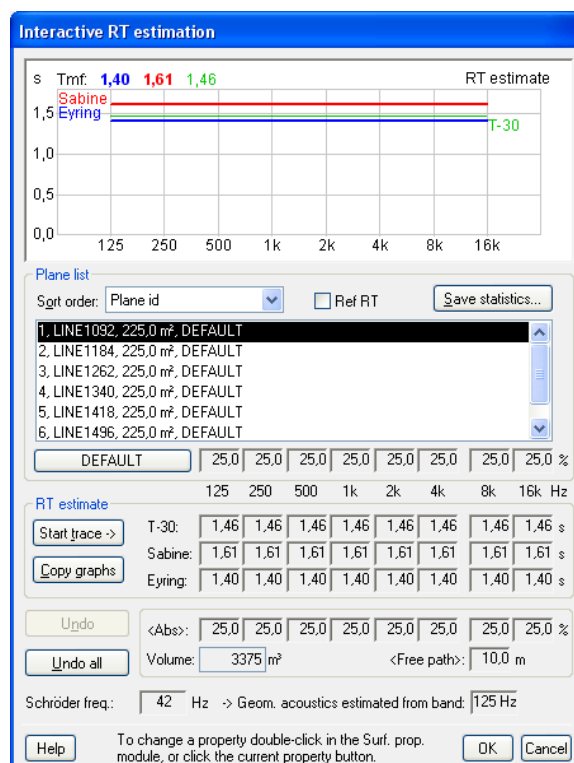


Figura 3.20: Ventana del método *Interactive RT estimation*

El algoritmo que realiza este cálculo utiliza el método de *Ray Tracing* global, es decir, los rayos no necesitan impactar sobre un determinado receptor. La fuente sonora que genera estos rayos es omnidireccional y corresponde a alguna de las definidas en *CATT*. Cada 100 rayos por octava se reevalúa y se actualiza el  $T_{30}$ . Al llegar a 3000 rayos la rutina finaliza [139].

La figura anterior muestra también información sobre las distintas superficies, el volumen y libre camino medio del recinto, así como los coeficientes medios de absorción para las bandas de octava indicadas anteriormente.

Otro dato de interés reflejado es el que hace referencia a la frecuencia de *Schröder*  $f_s$ , y consecuentemente, a la validez del modelo geométrico en que se basan los métodos aquí descritos. El programa sugiere que el límite inferior debe situarse en  $4f_s$  [140], tal y como se exponía en el apartado 2.3.3.

### 3.3.3 *Predict SxR (TUCT)*

A continuación se muestra la ventana del *Predict SxR* que nos permitirá la predicción de *RT* seleccionando uno de los 3 algoritmos disponibles y ajustando los parámetros de cálculo existentes. Previamente deberemos definir en *CATT* la fuente sonora y puntos de recepción [141].

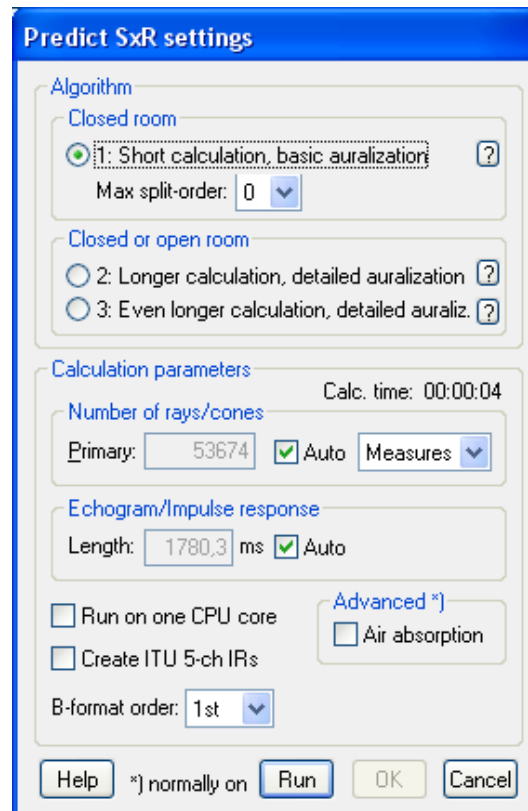


Figura 3.21: Ventana de configuración de opciones del método *Predict SxR*

#### a) Algoritmo 1

Este algoritmo se nos presenta adecuado para cálculos rápidos. El parámetro *Max split-order* acepta valores de 0 a 2 y determina el orden máximo hasta el que las reflexiones son tratadas de forma determinista [136]. Para órdenes  $n > \text{Max split-order}$ , las reflexiones difusas se tratan de forma aleatoria según b) de [3.3.1]. Debido a la naturaleza aleatoria de este método, distintas ejecuciones para una misma configuración pueden arrojar resultados diferentes. Los tiempos de simulación, sin embargo, son más moderados [136].

#### b) Algoritmo 2

Las reflexiones difusas en este algoritmo, incluso las de orden elevado, reciben un tratamiento determinista. Únicamente las reflexiones difusas muy débiles se tratan de forma estocástica [142]. Así pues, podemos

anticipar que los tiempos de simulación serán más elevados. A cambio, la predicción de fenómenos especulares tardíos como *Flutter Echos* [143] [144] es más precisa. Este método es adecuado también para recintos moderadamente abiertos y para la realización de auralizaciones detalladas [145].

### c) Algoritmo 3

Igual que en el método 2, se aplica un modelo determinista para los procesos de difusión incluso para órdenes de reflexión grandes. Solo las que son extremadamente débiles siguen un modelo estadístico. Este algoritmo proporciona auralizaciones muy detalladas e incluso puede utilizarse para la simulación de recintos abiertos [134].

El parámetro de *scattering* usado en los 3 algoritmos puede definirse individualmente en las propiedades de cada material según [146] o bien establecerse con un coeficiente por defecto generalizado a todas las superficies (entre 0% y 100%).

Respecto a los diferentes parámetros de cálculo de los algoritmos descritos podemos ajustar el número de rayos (*Primary Number of rays/cones*) o bien activar la casilla *Auto*. Para el algoritmo 1, el programa calculará automáticamente el valor necesario según la opción seleccionada: *Measures/Auralization/All cones* (esencialmente tiene que ver con el tipo de cálculo que queramos realizar afectando a la densidad de rayos en el recinto [147]). De la misma forma podemos determinar en *Length* la ventana de inspección. *Auto* selecciona el valor basándose en el *RT* de *Eyring* aunque en el caso de aplicar al modelo un coeficiente de dispersión bajo se incrementará esa cifra [147] al no generarse suficientes rayos/conos secundarios que introducen los fenómenos de dispersión. En una situación así, la densidad de estos rayos será menor y por eso se requiere ampliar el tiempo de evaluación para obtener resultados más precisos.

Por último, la casilla *Air absorption* nos permite decidir si queremos añadir la contribución de la absorción del aire a nuestra simulación.

La presentación de resultados del *Predict SxR* se muestra en la figura siguiente. Seleccionando el parámetro deseado en *Measure* podemos visualizar los valores del mismo y una representación gráfica. En *Echogram* se puede observar el nivel sonoro del conjunto de reflexiones detectadas en el punto seleccionado a lo largo del eje temporal.

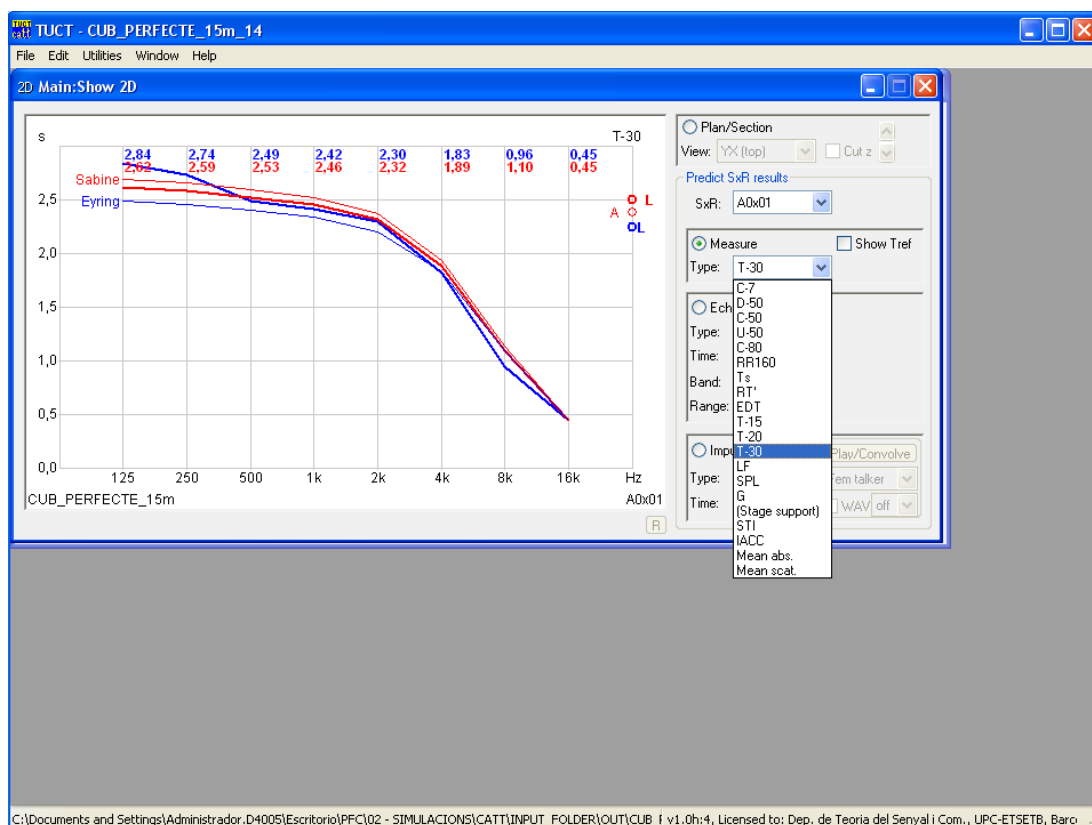


Figura 3.22: Ventana de resultados del método *Predict SxR* (CATT/TUCT)

Para el tiempo de reverberación disponemos diferentes indicadores ( $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ...) que además se pueden comparar en la ventana de resultados con los valores que proporcionan *Sabine* y *Eyring*.

Se observa que para el parámetro seleccionado aparecen 2 resultados y 2 curvas distintas designadas con color rojo y azul. Cada uno de ellos representa una forma distinta de extracción de los resultados. El color rojo hace referencia al método (*E*) o de obtención a través de la información energética de los ecogramas. El azul (*h*) corresponde a la obtención de la respuesta impulsional basada en los datos de presión sonora, como si se tratara del procesado realizado en una medición "*in situ*". Las diferencias entre ambos métodos será más apreciable cuanto más importancia tenga la fase de las reflexiones que intervienen en el recinto. Aunque la información real no es conocida, *TUCT* introduce la fase sintetizándola mediante procesado de señal (p.ej., creando filtros lineales de fase). El objetivo no es más que evidenciar la limitación del modelo acústico geométrico como, por ejemplo, para bandas de frecuencia bajas o recintos pequeños con una densidad modal no muy alta [148] (ver [2.3.3]).



## 4 Resultados de $RT$ . Recinto simple

### 4.1 Presentación del recinto simple

En este capítulo se presentan los resultados de las estimaciones de  $RT$  realizadas con los programas *EASE* y *CATT* para un recinto simple. Con estas simulaciones se comparan los diferentes métodos proporcionados por cada uno de los *softwares* evaluando diferentes aspectos como la convergencia de resultados, tiempos de simulación, influencia de los parámetros de cálculo o de las propiedades geométricas de los recintos y de los materiales que lo conforman. Asimismo resulta imprescindible establecer un tiempo de reverberación que sirva de referencia válida con el fin de valorar los resultados obtenidos con los dos programas.

#### 4.1.1 Hipótesis y premisas

Asumiendo la imposibilidad de encontrar un valor de  $RT$  “verdadero”, la realización de mediciones *in situ* se podría antojar como la forma más adecuada de obtener una referencia de  $RT$  pero este método tiene una serie de inconvenientes, tal y como se comenta en [1.1]. No obstante, en el capítulo 5 del presente documento se muestran los resultados de las mediciones en un recinto real.

La otra posibilidad de disponer de una referencia de  $RT$  es a través del resultado que nos ofrece la formulación clásica de *Sabine* (también *Eyring*). La teoría en la que se basa estas expresiones tiene limitaciones (ver 2.4.5) y asume ciertas condiciones que difícilmente se dan en los espacios reales. No obstante podemos simular un tipo de recinto que se ajuste a las características ideales para las que las fórmulas anteriores sean válidas. Así podremos comparar los resultados con los estimados por estos *softwares* sin la necesidad de caracterizar superficies complejas que añadirían incertidumbre.

Las características de nuestros recintos de prueba deberán cumplir las premisas que se extraen del apartado 2.4.5 y son las siguientes:

- Relación entre las dimensiones largo, ancho y alto de la sala no muy extremas (recinto regular)
- Uniformidad en los coeficientes de absorción a lo largo de las distintas superficies
- Absorción del recinto baja para cumplir las hipótesis de *Sabine* (para  $\alpha$  elevados *Eyring* resulta más preciso, ver 2.4.4)

Aunque tanto el modelo geométrico como el estadístico no tienen en cuenta la influencia de ondas estacionarias resulta apropiado analizar recintos que no sean susceptibles de generación de modos propios, puesto que en la realidad podrían darse tales fenómenos. Las ecuaciones [2-11] y sobre todo [2-13] determinan la frecuencia de corte a partir de la cual los efectos ondulatorios son menos apreciables y puede adoptarse el modelo de la acústica geométrica.

#### 4.1.2 Protocolo de simulación

Aunque el objetivo de este trabajo no sea el valor en sí de *RT* sino el análisis, comparación y discusión de los resultados de las dos herramientas informáticas objeto de estudio, las características y ubicaciones de la fuente sonora y puntos de recepción se ajustan a lo que establece la norma de medición de tiempo de reverberación UNE-EN ISO 3382-2. A continuación se describen los elementos principales para realizar las simulaciones.

- Fuente sonora de excitación: con el fin de poder comparar los dos simuladores se utiliza en ambos programas una fuente de ruido rosa de tipo omnidireccional con el mismo nivel de presión sonora (96,78 dB SPL a 1 m) y situada a una altura de 1,5 m del suelo
- Puntos de recepción: el punto o los puntos de evaluación tendrán la misma posición en ambos programas para facilitar, si procede, su comparación. La altura de todos ellos es de 1,20m respecto al suelo (equivalente a una persona sentada)
- Bandas de frecuencia analizadas: se analiza el margen de frecuencias comprendido entre 125 Hz y 4 kHz [22]
- Especificaciones básicas del PC: CPU Core 2 Duo E8500 3,16 GHz, RAM 3,49 GB, S.O Windows XP

En la mayoría de las simulaciones se utilizará únicamente una posición de fuente sonora y de recepción excepto en el apartado que se analiza la influencia de las distintas ubicaciones (apartado 4.7).

### 4.1.3 Datos y modelo de simulación

Como punto de partida se elabora el modelo de un recinto simple que nos permita analizar diferentes aspectos de los métodos disponibles en *EASE* y *CATT*. También que cumpla con las hipótesis sobre las que se sustenta la formulación clásica para disponer de un referencia de *RT* [4.1.1]. El recinto en cuestión tiene las siguientes características:

- Recinto mediano. No pequeño para no obtener una frecuencia de *Schröder* muy elevada pero, por el mismo motivo, tampoco excesivamente grande que pueda provocar valores altos de *RT* (recordemos que la absorción no puede ser muy elevada según se extrae de las hipótesis anteriormente comentadas)
- Dimensiones regulares: 15 m x 15 m x 15 m (forma cúbica)
- Inicialmente se considera absorción moderadamente baja ( $\alpha=0,10$ ) para todas las superficies y bandas de frecuencia. De lo contrario los tiempos de cálculo serían prohibitivos y se obtendrían valores de *RT* que limitarían demasiado el estudio geométrico
- Inicialmente no se considera *scattering* en las superficies
- Las condiciones ambientales definidas son: 20 °C y 60% de humedad relativa. En *EASE* 1013 hPa de presión y en *CATT* 1,1 kg/m<sup>3</sup> (estos dos últimos parámetros son coherentes entre sí [149])

En capítulos posteriores se estudiará también la influencia de la geometría del recinto y de los coeficientes de absorción y *scattering*. Así pues estos parámetros serán modificados en los apartados correspondientes respecto a los inicialmente previstos.

La figura siguiente muestra una vista del modelo en cuestión realizado con *EASE* y las ubicaciones de fuente sonora y punto de recepción inicialmente considerados.

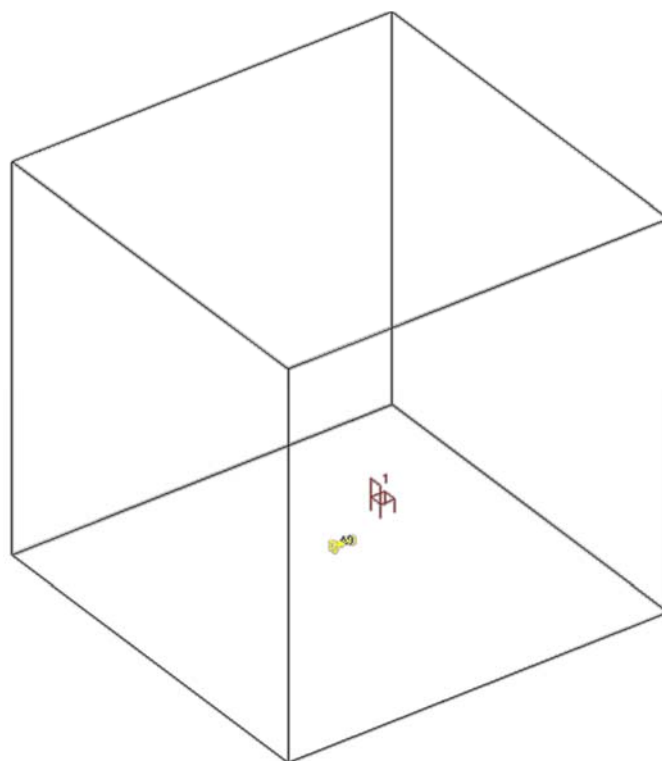


Figura 4.1: Vista del modelo elaborado con *EASE*, posición de la fuente sonora y punto de recepción

La Figura 4.2 muestra una vista del modelo de *CATT* y las ubicaciones de fuente sonora y punto de recepción inicialmente considerados.

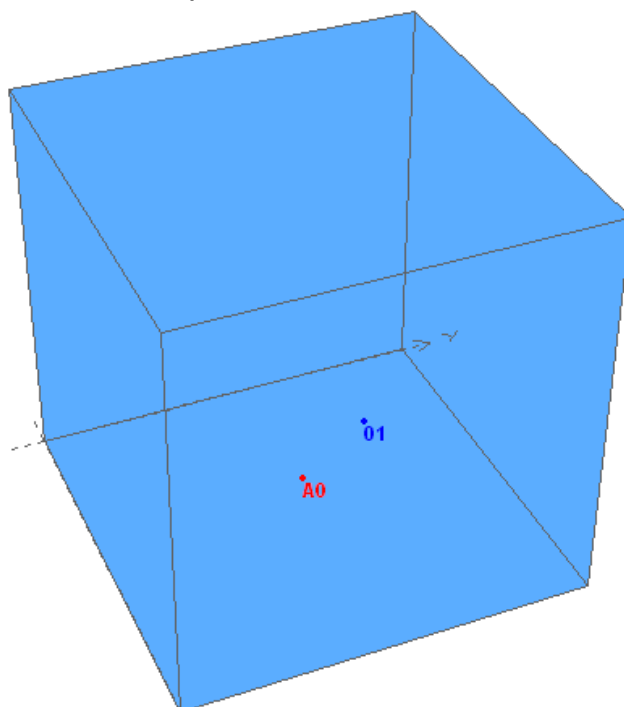


Figura 4.2: Vista del modelo elaborado en *CATT* y mismas posiciones de fuente y punto de recepción

#### 4.1.4 *RT de Sabine y Eyring*

La información que proporcionan ambos programas sobre la geometría del recinto diseñado es la siguiente:

- Volumen total: 3375 m<sup>3</sup>
- Área total de las superficies: 1350 m<sup>2</sup>
- Libre camino y tiempo medios: 10 m y 0,03 s, respectivamente
- $\bar{\alpha} = 0,10$  (coeficiente medio de absorción)

Los valores de tiempo de reverberación del recinto en cuestión que proporciona *EASE* para las siguientes frecuencias centrales de 1/3 de octava, teniendo en cuenta la absorción del aire son los siguientes:

Frecuencias centrales 1/3 octava (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
<i>RT de Sabine (EASE), en s</i>	4,07	4,07	4,05	3,96	3,66	2,80
<i>RT de Eyring (EASE), en s</i>	3,87	3,86	3,84	3,77	3,49	2,70

Tabla 4.1: *RT de Sabine y Eyring de EASE* (frecuencias de 1/3 octava)

Los valores de tiempo de reverberación que proporciona *CATT* para las mismas frecuencias centrales, por bandas de octavas, teniendo en cuenta la absorción del aire son:

Frecuencias centrales octavas (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
<i>RT de Sabine (CATT), en s</i>	3,99	3,92	3,78	3,62	3,32	2,53
<i>RT de Eyring (CATT), en s</i>	3,79	3,72	3,60	3,46	3,18	2,45

Tabla 4.2: *RT de Sabine y Eyring de CATT* (frecuencias de octava)

Si obviamos la absorción del aire en *CATT* (en *EASE* no se puede), puesto que  $\alpha$  es idéntico para todas las bandas, el valor de *RT de Sabine* que obtenemos es el mismo para todas ellas: **4,02 s**. Comparando con el resultado de la expresión [2-20] y sustituyendo los datos conocidos:

$$RT = 55,26 \frac{V}{cA} = 55,26 \frac{V}{c\bar{\alpha}S_t} = 55,26 \frac{3375}{343,54 \cdot 0,10 \cdot 1350} = 4,02 \text{ [s]} \quad [4-1]$$

*c*: velocidad de propagación del sonido en el aire según [2-3] y datos ambientales

*A*: absorción total del recinto

$\bar{\alpha}$ : coeficiente medio de absorción (en nuestro caso 0,10)

*S<sub>t</sub>*: superficie total del recinto

Podemos observar que *CATT* coincide con la ecuación de *Sabine*. En cambio *EASE*, aun pudiéndose obviar la absorción del aire, no coincidiría (el valor para 125 Hz y 250 Hz ya supera los 4,02 s). El motivo es que la fórmula que este último programa utiliza es [150]:

$$RT = 0,163 \frac{V}{A} [s] \quad [4-2]$$

El factor 0,163 incluye la velocidad de propagación del sonido para determinada temperatura sin tener en cuenta los valores de los parámetros ambientales ajustados en el programa. Además se han deducido los valores de absorción del aire de ambos *softwares* y tampoco coinciden.

Hay que destacar que los resultados que ofrece *EASE* son para tercios de octava mientras que los de *CATT* son para bandas de octava. En un principio, el significado del tiempo de reverberación obtenido por ambos *softwares* no es comparable puesto que provienen de definiciones de coeficientes de absorción para anchos de banda diferentes. No obstante, atendiendo únicamente al valor concreto de la frecuencia central y su aplicación en las fórmulas clásicas, no hay inconveniente para comparar el comportamiento de ambos programas con los resultados de las expresiones teóricas.

### 4.1.5 Aspectos a analizar

En los próximos apartados se presentan los resultados de las simulaciones realizadas con los diferentes métodos de *EASE* y *CATT* (ver apartados 3.2 y 3.3) para el recinto simple presentado. Se analizarán los siguientes aspectos:

- Convergencia: si los valores estimados tienden hacia un valor concreto o se estabilizan en función de las opciones de cálculo
- Tiempos de simulación: cuál es la evolución del coste computacional según los ajustes de las opciones de cálculo
- Validez de resultados: evaluación de los resultados comparándolos con los valores obtenidos con las expresiones clásicas de *Sabine* y *Eyring*

Las características de absorción, dispersión y condiciones ambientales utilizadas en estos apartados son los de [4.1.3]. Las posiciones de fuente y punto de recepción son los de la Figura 4.1 y Figura 4.2.

## 4.2 Resultados *Local Decay Time (EASE)*

A continuación se evalúa el método *Local Decay Time* de *EASE* presentando los resultados de *RT* para el recinto considerado. Las opciones de cálculo se ajustan en función del aspecto a analizar.

### 4.2.1 Convergencia

En este apartado observaremos la variación de los tiempos de reverberación en función de los parámetros ajustables (*Time*, *Order* y *Rays*) y si existe convergencia o no.

*Order* está relacionado con *Time* según [3-1] según el libre tiempo medio del recinto estudiado. Seleccionando un *Time* de 4 segundos (*RT* esperado según la fórmula de *Sabine*) determinamos una ventana temporal representativa del decaimiento sonoro de la sala. En este caso el orden de reflexión sería:

$$Time [ms] = n \cdot t_m = 4000 \rightarrow 30 \cdot n = 4000 \rightarrow n = \frac{4000}{30} = 134 \quad [4-3]$$

*n*: orden de reflexión (*Order*)

*t<sub>m</sub>*: libre tiempo medio del recinto, en ms (30 ms)

Aunque este valor es un buen punto de partida se obtiene de información estadística por lo que deberemos observar cuál es la convergencia de este parámetro para el *Time* determinado. El número de rayos en este caso no resulta relevante (seleccionamos, p. ej., 5000).

Parámetros			Tiempo de reverberación, en s (1/3 octava, en Hz)					
<i>Time</i> (ms)	<i>Order</i>	<i>Rays</i>	125	250	500	1000	2000	4000
4000	140	5000	4,33	4,33	4,32	4,27	4,08	3,48
4000	150	5000	4,23	4,22	4,21	4,17	3,99	3,41
4000	160	5000	4,14	4,14	4,13	4,08	3,91	3,36
4000	170	5000	4,15	4,15	4,13	4,09	3,92	3,36

Tabla 4.3: Valores de *RT* del *Local Decay Time* en función del parámetro *Order* (*Time*: 4000 ms, *Rays*: 5000)

Se aprecia que a partir de *Order* 160 los valores tienden a converger. Otro indicador de que esta cifra es suficiente es el hecho de que para órdenes mayores ya no se incrementa el tiempo de cálculo. Se asume que dentro del tiempo seleccionado y con esa cantidad de rayos, estos no realizan, en general, más de 160 reflexiones. Una vez tenemos el valor de

Order realizamos distintas simulaciones variando *Rays* para observar la convergencia de este parámetro.

Parámetros			Tiempo de reverberación, en s (1/3 octava, en Hz)					
<i>Time</i> (ms)	<i>Order</i>	<i>Rays</i>	125	250	500	1000	2000	4000
4000	160	500	4,17	4,16	4,15	4,11	3,94	3,38
4000	160	1000	4,15	4,15	4,13	4,09	3,92	3,36
4000	160	2000	4,15	4,15	4,14	4,10	3,93	3,37
4000	160	5000	4,14	4,14	4,13	4,08	3,91	3,36
4000	160	10mil	4,14	4,14	4,12	4,08	3,91	3,36
4000	160	20mil	4,15	4,14	4,13	4,09	3,92	3,36
4000	160	30mil	4,15	4,14	4,13	4,09	3,92	3,36

Tabla 4.4: Variación de RT del *Local Decay Time* según el número de rayos (*Time* 4000 ms y *Order* asociado)

De la tabla anterior se extrae que para el parámetro temporal que se ha seleccionado los datos no varían prácticamente desde un inicio. Podríamos establecer el número de 5000/10000 rayos como una cifra a partir de la cual los resultados apenas cambian. Presumiblemente serán necesarios aún menos rayos para tiempos de inspección inferiores (cuanto menor es la ventana temporal, menos rayos se requieren para conseguir una misma densidad de estos).

Los resultados que ofrece este método no son idénticos aun repitiendo la simulación con las mismas opciones de cálculo, tal y como se muestra en la tabla.

#	Parámetros			Tiempo de reverberación, en s (1/3 octava, en Hz)					
	<i>Time</i> (ms)	<i>Order</i>	<i>Rays</i>	125	250	500	1000	2000	4000
1	4000	160	10mil	4,14	4,14	4,12	4,08	3,91	3,36
2	4000	160	10mil	4,15	4,14	4,13	4,09	3,92	3,36
3	4000	160	10mil	4,16	4,16	4,15	4,10	3,93	3,37

Tabla 4.5: Variación de RT del *Local Decay Time* repitiendo la simulación con las mismas opciones de cálculo

Para el número de rayos considerado en la tabla anterior los valores no varían en exceso. Para valores bajos del parámetro *Rays* se pueden obtener resultados más dispares puesto que la cantidad de rayos no es suficiente para proporcionar un promedio estable.

A continuación vamos a comprobar a partir de qué ventana temporal convergen los resultados. Para ello se procede a ir incrementando el tiempo de inspección y observar los valores obtenidos. Se fija el número de rayos



en 10000, que teniendo en cuenta lo comentado en la Tabla 4.4, son suficientes para los tiempos de investigación que se consideran. El orden de reflexión para cada *Time* se establece según el procedimiento descrito en la Tabla 4.3.

Parámetros			Tiempo de reverberación, en s (1/3 octava, en Hz)					
<i>Time</i> (ms)	<i>Order</i>	<i>Rays</i>	125	250	500	1000	2000	4000
500	20	10mil	3,75	3,74	3,73	3,70	3,56	3,09
1000	40	10mil	3,82	3,82	3,81	3,77	3,63	3,14
1500	60	10mil	3,89	3,89	3,88	3,84	3,69	3,19
2000	80	10mil	3,93	3,93	3,91	3,87	3,72	3,22
2500	100	10mil	3,99	3,99	3,98	3,94	3,78	3,26
3000	120	10mil	4,05	4,04	4,03	3,99	3,83	3,30
3500	140	10mil	4,10	4,10	4,09	4,05	3,88	3,33
4000	160	10mil	4,14	4,14	4,12	4,08	3,91	3,36

Tabla 4.6: Variación de *RT* del *Local Decay Time* para diferentes ventanas temporales (número de rayos: 10 mil)

Al aumentar la ventana temporal observamos como obtenemos un tiempo de reverberación cada vez más elevado. Esto no es extraño puesto que al aumentar el tiempo de inspección cambia el rango de evaluación sobre el decaimiento sonoro (indicaría que no se trata de una curva lineal como se presumiría de un campo totalmente difuso, ver 2.4.5). De todas formas, si *Time* se acerca al tiempo de reverberación esperado los resultados deberían converger pero esto no sucede.

Viendo esta tendencia se realizan simulaciones con un *Time* más allá del tiempo esperado proporcionado por las fórmulas clásicas y se confirma que los valores de *RT* aún siguen creciendo como se muestra en la tabla siguiente. Este comportamiento carece de sentido.

Parámetros			Tiempo de reverberación, en s (1/3 octava, en Hz)					
<i>Time</i> (ms)	<i>Order</i>	<i>Rays</i>	125	250	500	1000	2000	4000
5000	200	20mil	4,26	4,26	4,24	4,20	4,02	3,43
6000	240	20mil	4,35	4,34	4,33	4,28	4,10	3,49
7000	280	30mil	4,44	4,43	4,42	4,37	4,18	3,55
8000	320	30mil	4,53	4,53	4,51	4,46	4,26	3,61

Tabla 4.7: Valores de *RT* del *Local Decay Time* para tiempos mayores al *RT* esperado según *Sabine*

## 4.2.2 Tiempos de simulación

La figura siguiente muestra la evolución de los tiempos de simulación para determinadas ventanas de tiempo en función del número de rayos.

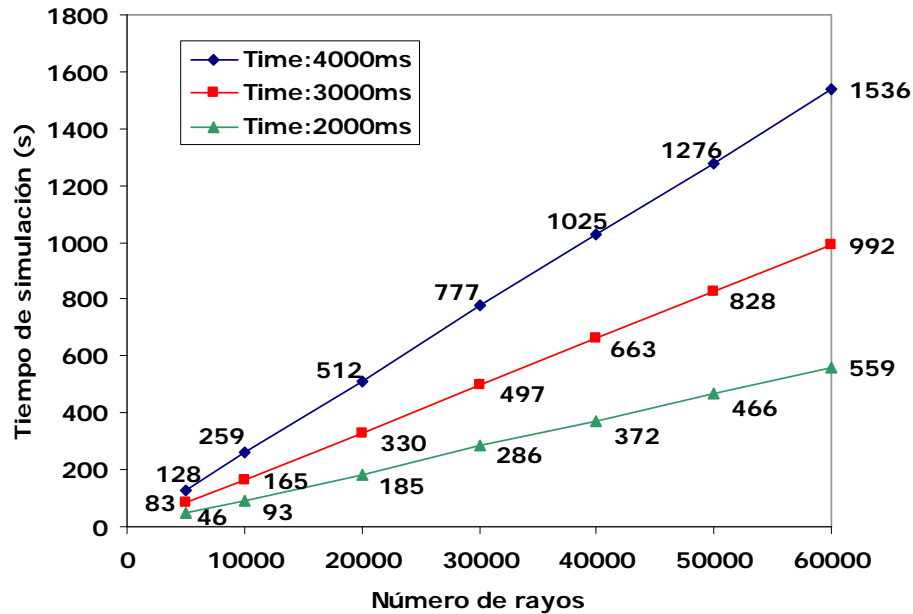


Figura 4.3: Evolución del tiempo de simulación en función del número de rayos para distintos *Time* (método *Local Decay Time*)

Se aprecia que el tiempo de cálculo requerido sigue una progresión proporcional al número de rayos.

Si se fija el parámetro *Rays*, al variar la ventana de tiempo la evolución del tiempo de cálculo es la siguiente:

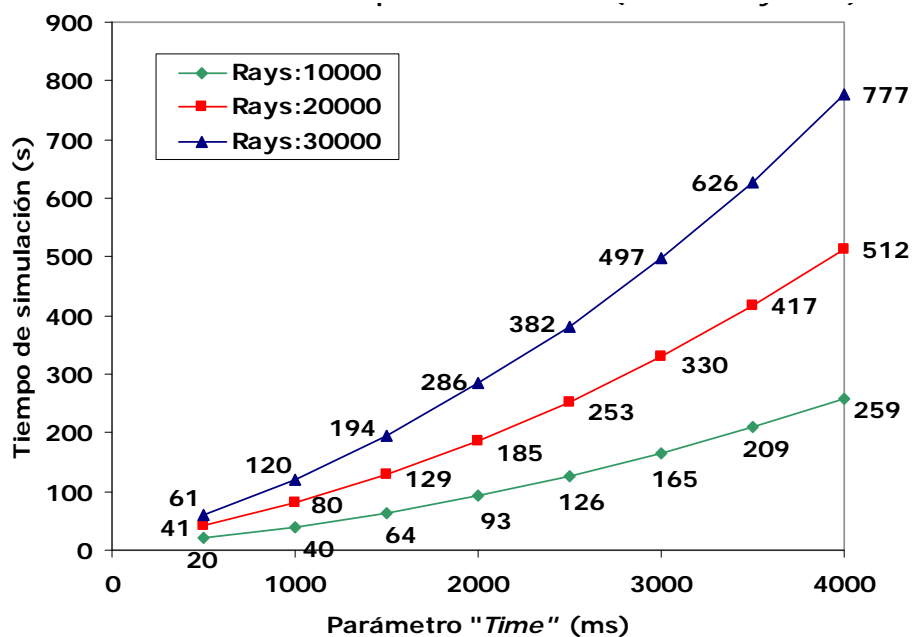


Figura 4.4: Evolución del tiempo de simulación en función de la ventana temporal para distinto número de rayos (*Local Decay Time*)

### 4.2.3 Validez de resultados

Tal y como se refleja en la Tabla 4.7 este método no presenta convergencia observable a medida que incrementamos el parámetro *Time*. El hecho de que los resultados sigan creciendo al seleccionar una ventana de inspección mucho más allá del *RT* esperado no nos permite establecer validez alguna a los valores obtenidos. Quizás, con posterioridad, se podrán comparar con los que ofrecen otros métodos de cálculo pero en un principio se descarta el *Local Decay Time* para el cálculo de los tiempos de reverberación en este documento.

## 4.3 Resultados *Ray Tracing Impacts* (EASE)

Según lo descrito en [3.2.3] el acceso al algoritmo *Ray Tracing Impacts* de EASE se puede realizar de dos formas distintas. Al no necesitar visualizar los caminos de los rayos, ni gestionar ningún fichero para procesados posteriores la opción seleccionada en este apartado ha sido la realización de las simulaciones mediante el *Local Ray Tracing*.

Esta opción también permite elegir el algoritmo *Mirror Image Impacts* basado en *Image Source* (ver [0]). Se ha realizado una simulación de prueba y, a pesar de que nuestra sala es sencilla, si ajustamos un *Order* de 80 y *Delay* de 2000 ms (aproximadamente la mitad del *RT* esperado según *Sabine*) el tiempo de cálculo requerido no se puede asumir (el programa estima más de 1 día y 8 h). Así pues queda descartado este método y las simulaciones realizadas se han efectuado con el algoritmo *Ray Tracing Impacts*.

A continuación se procede a evaluar esta rutina análogamente a como se ha realizado en el método anterior.

### 4.3.1 Convergencia

Los parámetros que se pueden ajustar en esta ocasión son los mismos que en el caso anterior: *Rays*, *Order* y *Delay*. Los valores de *Order* para las distintas ventanas de tiempo son los mismos que se han utilizado en el anterior método (se han realizado simulaciones y se observa que para los valores de orden de reflexión considerados hay convergencia, tanto en tiempos de cálculo como en resultados). En este método, el registro de los rayos que alcanzan el receptor se basa en la detección de impactos. Por eso tenemos el indicador *Impact Chance* (ver [3.2.3]).

Siguiendo el mismo criterio que en el anterior apartado se han realizado simulaciones para un tiempo de 4000 ms variando el número de rayos con el fin de observar la variación de *RT*. Los valores que figuran en las tablas siguientes son los resultados sin aplicar el método de *Schröder*.

Parámetros			Tiempo de reverberación, en s (1/3 octava, en Hz)					
<i>Delay</i> (ms)	<i>Order</i>	<i>Rays</i>	125	250	500	1000	2000	4000
4000	160	500	3,74	3,73	3,72	3,64	3,38	2,63
4000	160	1000	3,66	3,65	3,63	3,57	3,32	2,59
4000	160	2000	3,68	3,67	3,65	3,59	3,33	2,60
4000	160	5000	3,73	3,72	3,70	3,63	3,37	2,63
4000	160	10mil	3,74	3,74	3,72	3,65	3,39	2,63
4000	160	20mil	3,74	3,73	3,71	3,64	3,38	2,63
4000	160	50mil	3,74	3,73	3,71	3,64	3,38	2,63
4000	160	100mil	3,73	3,72	3,70	3,63	3,37	2,62
4000	160	200mil	3,73	3,73	3,71	3,64	3,38	2,63

Tabla 4.8: Variación de *RT* en función del número de rayos (*Time*: 4000 ms) del *Local Ray Tracing/Ray Tracing Impacts*

Se observa que a partir de 5000 rayos los resultados tienden a converger.

La siguiente tabla muestra los resultados de *RT* para distintos *Delays* con el fin de observar a partir de qué tiempo hay convergencia. Fijamos *Rays* en 20 mil (por encima del valor de convergencia de la Tabla 4.8).

Parámetros			Tiempo de reverberación, en s (1/3 octava, en Hz)					
<i>Delay</i> (ms)	<i>Order</i>	<i>Rays</i>	125	250	500	1000	2000	4000
500	20	20mil	3,57	3,57	3,55	3,48	3,25	2,55
1000	40	20mil	3,64	3,64	3,62	3,55	3,30	2,58
1500	60	20mil	3,69	3,68	3,67	3,60	3,34	2,61
2000	80	20mil	3,70	3,70	3,68	3,61	3,35	2,61
2500	100	20mil	3,71	3,71	3,69	3,62	3,36	2,62
3000	120	20mil	3,72	3,72	3,70	3,63	3,37	2,62
3500	140	20mil	3,73	3,72	3,70	3,63	3,37	2,62
4000	160	20mil	3,74	3,73	3,71	3,64	3,38	2,63

Tabla 4.9: Valores de *RT* del *Local Ray Tracing/Ray Tracing Impacts* para diferentes tiempos (*Rays*: 20 mil)

De la tabla anterior se extrae que los valores aumentan en función del tiempo considerado pero lo hacen de forma lenta, sobre todo a partir de 1500 ms. Si bien se aprecia una tendencia, no se puede definir ningún tiempo a partir del cual exista convergencia absoluta. En las simulaciones realizadas en este apartado el *Impact Chance* es muy bajo (alcanzar un valor del 50% para 4000 ms serían necesarios más de 5 millones de rayos y tiempos de simulación elevadísimos). No obstante, los reflectogramas presentan una buena densidad de rayos (ver 6.1.3).

Si se realizan simulaciones para tiempos más allá del *RT* esperado (más de 4000 ms) y una cantidad de rayos elevada para asegurar una buena densidad de estos a lo largo del eje temporal obtenemos:

Parámetros			Tiempo de reverberación, en s (1/3 octava, en Hz)					
<i>Delay</i> (ms)	<i>Order</i>	<i>Rays</i>	125	250	500	1000	2000	4000
5000	200	100mil	3,74	3,74	3,72	3,65	3,39	2,63
6000	240	100mil	3,75	3,75	3,73	3,66	3,40	2,64
8000	320	100mil	3,76	3,76	3,74	3,67	3,41	2,76

Tabla 4.10: Tiempos de reverberación del *Local Ray Tracing* para *Delays* mayores al *RT* esperado según *Sabine*

Al incrementar la ventana de inspección los resultados no convergen hacia un valor absoluto pero sí que tienden a variar muy poco (no como sucedía en el *Local Decay Time* que aumentaban claramente).

### 4.3.2 Tiempos de simulación

Respecto a los tiempos de cálculo en función del número de rayos se observa una tendencia lineal. La figura siguiente muestra simulaciones para distintas ventanas temporales.

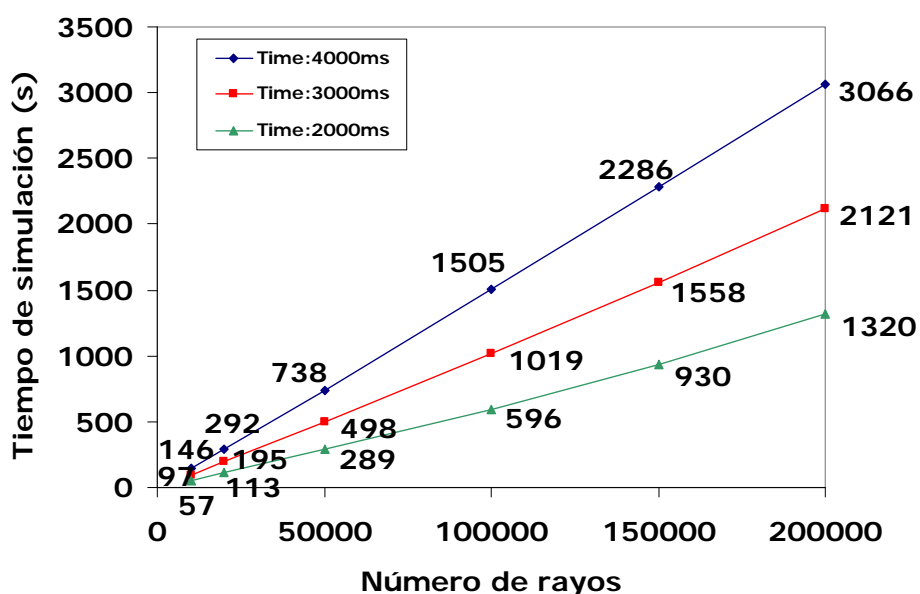


Figura 4.5: Evolución del tiempo de simulación para distinto número de rayos para diferentes *Times* (*Local Ray Tracing*/*Ray Tracing Impacts*)

Al doblar el número de rayos se dobla, aproximadamente, el tiempo de cálculo.

Si fijamos el número de rayos la evolución del coste computacional para diferentes ventanas de tiempo no es lineal. La tendencia es exponencial y más acusada cuantos más rayos intervengan en la simulación. Esto se aprecia en la Figura 4.6.

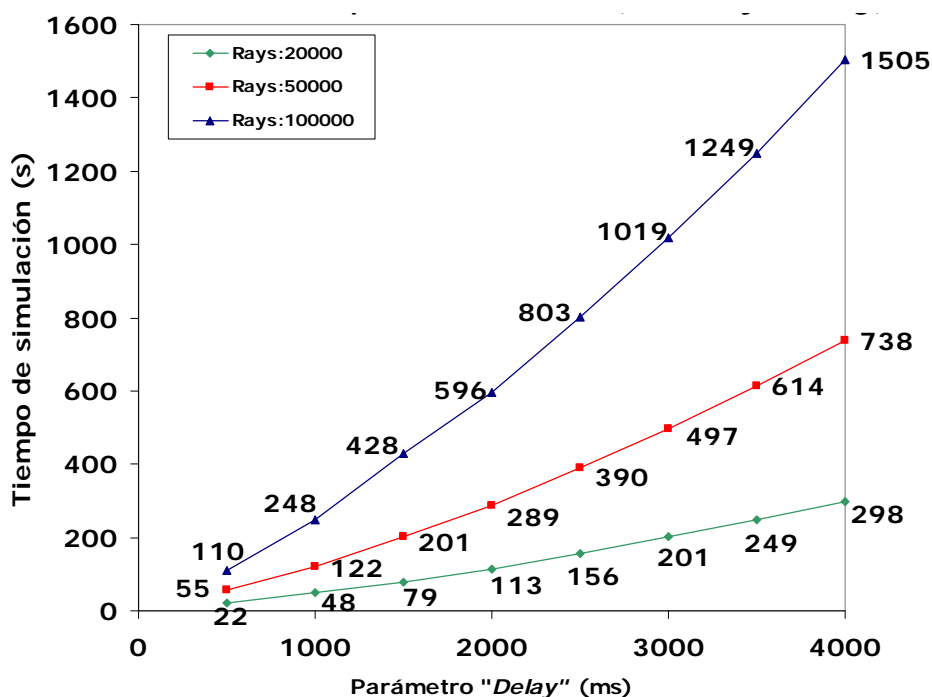


Figura 4.6: Evolución del tiempo de simulación en función de la ventana temporal para distinto número de rayos (*Local Ray Tracing/Ray Tracing Impacts*)

### 4.3.3 Validez de resultados

Este método no nos ofrece un valor absoluto de  $RT$  pero, como hemos visto, los resultados sí que se estabilizan a medida que aumentamos el tiempo de inspección.

Puesto que este método arroja resultados diferentes para repetidas simulaciones con los mismos ajustes de cálculo se realiza un promedio de 5 realizaciones para *Delay*: 4000 ms y *Rays*: 20 mil (ventana temporal y número de rayos suficiente para obtener valores estables).

Tiempo de reverberación, en s (1/3 octava, en Hz)						
<b>Realizaciones</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
Simulación 1	3,74	3,73	3,71	3,64	3,38	2,63
Simulación 2	3,75	3,74	3,73	3,65	3,39	2,64
Simulación 3	3,73	3,72	3,70	3,63	3,37	2,63
Simulación 4	3,73	3,73	3,71	3,64	3,37	2,63
Simulación 5	3,72	3,71	3,70	3,62	3,38	2,62
<b>Promedio</b>	<b>3,73</b>	<b>3,73</b>	<b>3,71</b>	<b>3,64</b>	<b>3,38</b>	<b>2,63</b>

Tabla 4.11: Resultados de las distintas realizaciones con *Local Ray Tracing/Ray Tracing impacts* y promedio, por bandas de 1/3 de octava (4000 ms y 20 mil rayos)

El gráfico siguiente muestra la comparación entre valor promedio representativo obtenido con *Local Ray Tracing/Ray Tracing Impacts* y los resultados procedentes de *Sabine* y *Eyring*.

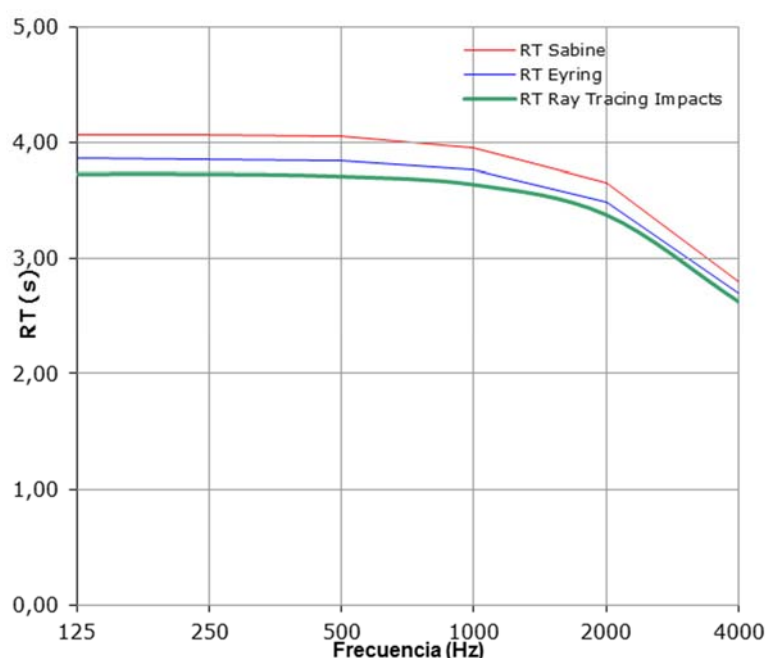


Figura 4.7: Valores de *RT* obtenidos con *Ray Tracing Impacts* y resultados de *Sabine* y *Eyring* de *EASE* (bandas de 1/3 octava)

El gráfico muestra que los resultados de este método se sitúan por debajo de los valores procedentes de la formulación clásica. Se han realizado simulaciones aplicando el método de *Schröder* y los valores son notablemente menores.



## 4.4 Resultados *AURA* (*EASE*)

El módulo *AURA* de *EASE* (ver 3.2.5) nos permite investigar el tiempo de reverberación de las simulaciones a través de alguno de estos parámetros: *EDT*,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  y  $T_{30}$ . Las definiciones de estos indicadores se pueden encontrar en el apartado 2.2.4 del presente documento.

Por los motivos que se enumeran en ese mismo punto del trabajo el parámetro  $T_{30}$  es mostrado en los resultados. En esta ocasión no disponemos de ninguna opción de cálculo referente al orden de reflexión como ocurría en las rutinas precedentes. Además del número de partículas *particles* y longitud temporal *Length* requeridos se selecciona *Energy Loss* como el método de evaluación de la absorción en las superficies por ser más preciso sin necesidad de un elevado número de rayos sonoros [151].

### 4.4.1 Convergencia

En primer lugar se realizan simulaciones para un tiempo aproximado al *RT* esperado (unos 4 segundos) y distinto número de rayos/partículas.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 octava, en Hz)							
<i>Length</i> (ms)	<i>Particles</i>	125	250	500	1000	2000	4000
4000	20mil	4,13	4,13	4,11	4,03	3,71	2,79
4000	50mil	4,06	4,06	4,03	3,94	3,60	2,74
4000	100mil	4,08	4,08	4,06	3,97	3,65	2,78
4000	200mil	4,10	4,09	4,07	3,98	3,65	2,77
4000	500mil	4,09	4,08	4,06	3,97	3,64	2,75
4000	1million	4,10	4,09	4,07	3,98	3,64	2,75

Tabla 4.12: Evolución del parámetro  $T_{30}$  en *AURA* en función del número de partículas (tiempo 4000 ms), bandas de 1/3 de octava

Como se puede ver en la tabla anterior resulta difícil observar la convergencia hacia unos valores determinados de *RT* puesto que sucesivas repeticiones de simulaciones con opciones de cálculo idénticas arrojan resultados diferentes. La variación de resultados para distintas realizaciones tiende a estabilizarse cuanto mayor es el número de rayos.

Se han realizado simulaciones para diferentes longitudes temporales y una cantidad de rayos suficientemente elevada (según información proporcionada por la Tabla 4.12) con el fin de comprobar si, a partir de algún tiempo, los resultados tienden a converger.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 octava, en Hz)							
<i>Length</i> (ms)	<i>Particles</i>	125	250	500	1000	2000	4000
1500	500mil	3,02	3,02	3,01	2,98	2,89	2,54
2000	500mil	3,57	3,57	3,56	3,52	3,36	2,73
2500	500mil	3,91	3,91	3,89	3,83	3,57	2,75
3000	500mil	4,06	4,06	4,03	3,95	3,64	2,76
3500	500mil	4,08	4,08	4,05	3,96	3,64	2,75
4000	500mil	4,09	4,08	4,06	3,97	3,64	2,76

Tabla 4.13: Evolución del  $T_{30}$  en función de la longitud temporal (500 mil *Particles*) en *AURA*, bandas de 1/3 de octava

De la Tabla 4.13 se puede apreciar que los valores tienden a converger a partir de 3000 ms. Esto nos indica que la curva de decaimiento sonora a partir de ese tiempo en adelante varía muy poco, proporcionando una evaluación del  $T_{30}$  parecida.

También se han realizado simulaciones más allá del tiempo de reverberación esperado según la ecuación de *Sabine* para comprobar si los valores de *RT* siguen creciendo como sucedía con el *Local Decay Time*.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 octava, en Hz)							
<i>Length</i> (ms)	<i>Particles</i>	125	250	500	1000	2000	4000
5000	500mil	4,09	4,08	4,06	3,97	3,64	2,76
6000	500mil	4,09	4,09	4,06	3,97	3,64	2,75
8000	500mil	4,09	4,08	4,06	3,96	3,64	2,75

Tabla 4.14: Valores de  $T_{30}$  de *AURA* para tiempos de inspección mayores al tiempo de reverberación esperado (500 mil partículas), bandas de 1/3 de octava

En esta ocasión observamos que el tiempo de reverberación no aumenta y el comportamiento es el esperado.

#### 4.4.2 Tiempos de simulación

Si bien el número de partículas (rayos sonoros) utilizados es más elevado que en métodos anteriores, se puede comprobar en la siguiente figura que los tiempos de simulación son mucho más pequeños. El crecimiento del coste computacional sigue siendo proporcional al número de rayos.

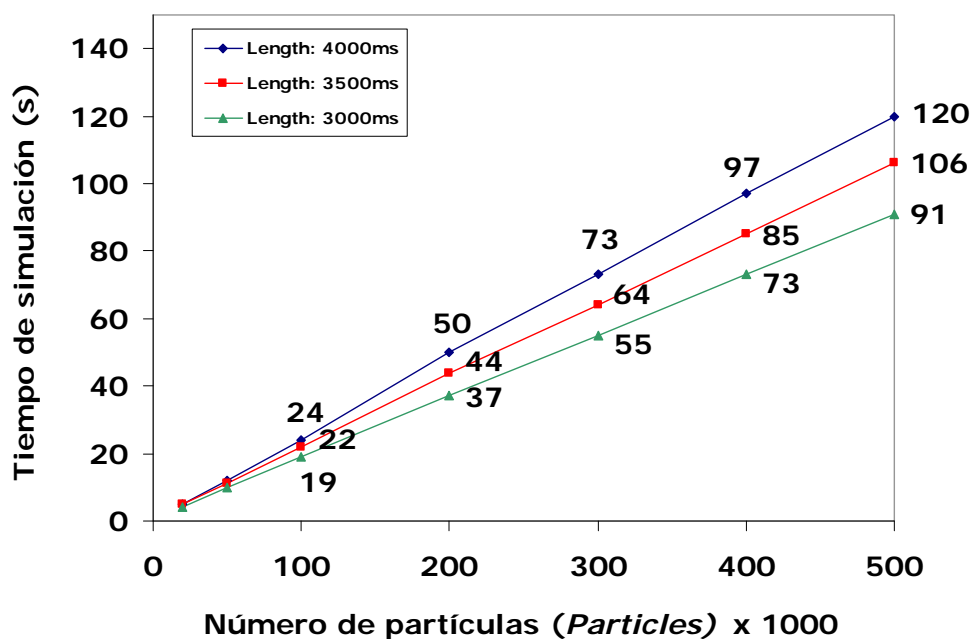


Figura 4.8: Evolución de tiempos de simulación en función del número de partículas para diferentes *Length* (método AURA)

Igual tendencia presentan los tiempos de simulación al incrementarse la ventana temporal de inspección.

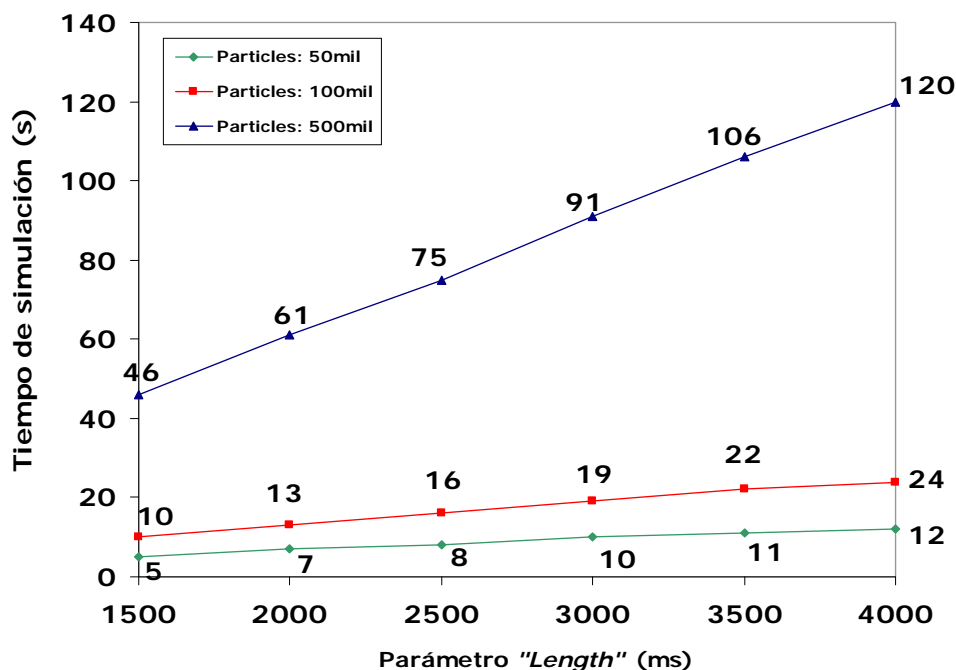


Figura 4.9: Evolución de tiempos de simulación en función de *Length* para diferente número de partículas (método AURA)

### 4.4.3 Validez de resultados

Antes de evaluar la validez de los resultados necesitamos encontrar un *RT* representativo de las simulaciones realizadas. Debido a la variación en los resultados incluso con las mismas opciones de cálculo se propone efectuar un promedio de varias realizaciones con el método *AURA* para un tiempo de 4000 ms y 500 mil rayos (valores que nos garantizan convergencia).

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 octava, en Hz)						
<i>Realizaciones</i>	125	250	500	1000	2000	4000
Simulación 1	4,09	4,08	4,06	3,97	3,64	2,75
Simulación 2	4,09	4,08	4,06	3,97	3,64	2,76
Simulación 3	4,10	4,09	4,07	3,98	3,65	2,75
Simulación 4	4,10	4,09	4,07	3,98	3,65	2,76
Simulación 5	4,10	4,10	4,07	3,98	3,65	2,76
<b>Promedio</b>	4,10	4,09	4,07	3,98	3,65	2,76

Tabla 4.15: Resultados de las distintas realizaciones de la simulación con *AURA* y promedio, por bandas de 1/3 de octava (4000 ms y 500 mil rayos)

La figura siguiente muestra una comparación gráfica entre los valores del *RT* promedio mostrados en la tabla anterior y los de *Sabine* y *Eyring* que proporciona *EASE* (Tabla 4.1).

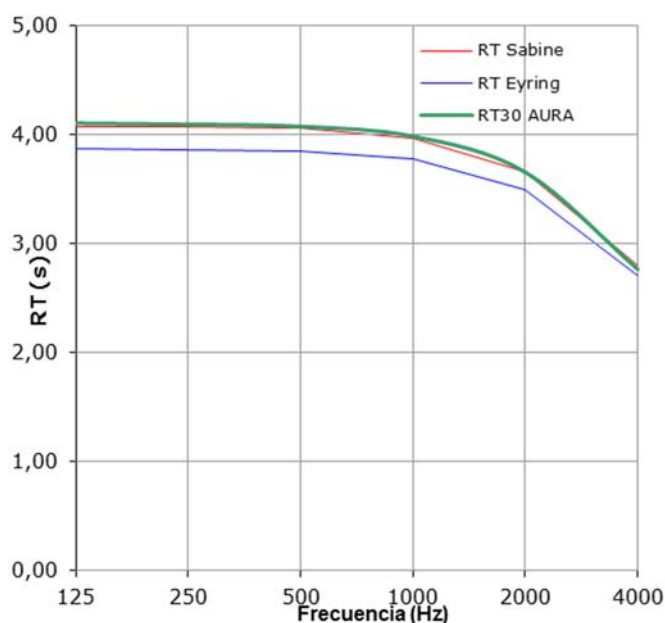


Figura 4.10: Representación del *RT* ( $T_{30}$ ) obtenido con *AURA* junto a los valores de *Sabine* y *Eyring* que proporciona *EASE* (bandas de 1/3 octava)

Como se puede apreciar los resultados son prácticamente idénticos al *RT* de *Sabine* de *EASE*, situándose por encima de *Eyring*.

## 4.5 Resultados *Interactive RT Estimation* (CATT)

Este método no tiene parámetros ajustables. Simplemente ejecuta una simulación rápida y nos ofrece los valores de  $RT$ , por bandas de octava, a través del parámetro  $T_{30}$ . Hay que mencionar que esta rutina es global, es decir, los resultados no hacen referencia a ningún punto de recepción concreto.

### 4.5.1 Convergencia

Puesto que no hay opciones de cálculo, en este apartado únicamente podemos señalar que la ejecución de repetidas simulaciones da como resultado valores prácticamente idénticos.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)						
Realizaciones	125	250	500	1000	2000	4000
Simulación 1	3,96	3,88	3,75	3,58	3,27	2,48
Simulación 2	3,95	3,87	3,73	3,57	3,26	2,48
Simulación 3	3,97	3,88	3,75	3,58	3,27	2,48
Simulación 4	3,98	3,90	3,76	3,59	3,28	2,49
Simulación 5	3,98	3,90	3,76	3,60	3,28	2,49
Promedio	3,97	3,89	3,75	3,58	3,27	2,48

Tabla 4.16: Resultados de  $T_{30}$  con *Interactive RT Estimation* para repetidas simulaciones y su promedio (bandas de octava)

### 4.5.2 Tiempos de simulación

El tiempo de simulación es muy bajo. Los resultados se ofrecen casi de forma inmediata para el recinto sencillo considerado.

### 4.5.3 Validez de resultados

La figura siguiente muestra el resultado del *Interactive RT Estimation* para el espacio contemplado.

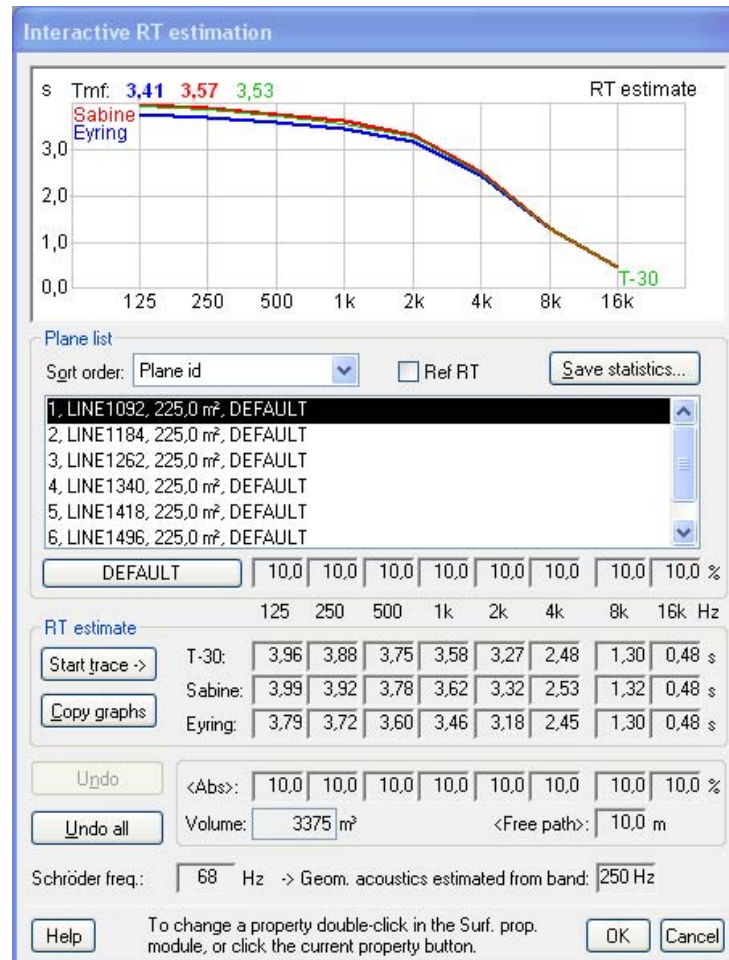


Figura 4.11: Representación de una realización de  $T_{30}$  obtenido con el *Interactive RT Estimation* (verde), valores de *Sabine* (rojo) y *Eyring* (azul), por bandas de octava

Los valores de este método se sitúan muy cerca de los de *Sabine* (ligeramente por debajo) mientras que son más altos que los de *Eyring*. Podemos asumir que esta rutina ofrece unos resultados algo más bajos, puesto que calcular el *RT* global tiene el significado de un promedio para todo el espacio. Este tiempo de reverberación será menor que para un punto concreto del recinto.

Cabe mencionar que este método indica la frecuencia de corte de *Schröder* así como la banda de frecuencias mínima a partir de la cual se puede aplicar la acústica geométrica. En el caso que nos ocupa sucede a partir de 250 Hz. Esta información debería tenerse en cuenta a la hora de estimar el *RT* del recinto real (si lo hubiera con las características del modelo diseñado) pero al comparar los resultados con las ecuaciones clásicas, que no tienen en cuenta los fenómenos ondulatorios, no es especialmente importante para el análisis que se lleva a cabo en este apartado.

## 4.6 Resultados *Predict SxR (TUCT)*

En este apartado se presentan los resultados del *Predict SxR (CATT/TUCT)* y se analizan distintos aspectos, análogamente a como se ha realizado hasta el momento. Los valores mostrados en este apartado corresponden al método *E* (ver 3.3.3) que estima el *RT* basándose en los ecogramas calculados según las contribuciones energéticas de los rayos/conos detectados en recepción [152]. Se ha optado por dicho método puesto que guarda similitud con el desarrollo de las teorías clásicas tomadas como referencia.

### 4.6.1 Convergencia

Si se obvian los fenómenos de *scattering*, tal y como hemos supuesto inicialmente, este método únicamente nos deja utilizar el algoritmo 1 ya que los otros tienen en cuenta reflexiones dispersivas (ver 3.3.1). Además se puede realizar la simulación sin necesidad de ajustar el número de rayos/conos ni la longitud del ecograma. El programa en este caso lo hace de forma automática. El resultado de tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ) que se obtiene para banda de octava es el siguiente:

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)							
<i>Rays/ Cones</i>	<i>Length (ms)</i>	125	250	500	1000	2000	4000
AUTO (53674)	AUTO (4940,8)	4,03	3,95	3,80	3,63	3,29	2,51

Tabla 4.17: Valores de  $T_{30}$  del *Predict SxR* (algoritmo 1) en configuración automática, por bandas de octava

Las cifras que aparecen debajo de *AUTO* hacen referencia a los valores que realmente ajusta el programa para cada parámetro.

Con el objetivo de comprobar si el procedimiento automático es suficiente se procede a realizar distintas simulaciones variando manualmente el número de rayos y observar si existe convergencia.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)							
<i>Rays/ Cones</i>	<i>Length (ms)</i>	125	250	500	1000	2000	4000
10mil	AUTO	3,97	3,91	3,79	3,64	3,32	2,47
50mil	AUTO	4,10	4,10	3,87	3,69	3,36	2,54
100mil	AUTO	4,09	4,00	3,85	3,67	3,34	2,53
1millón	AUTO	4,10	4,01	3,87	3,69	3,35	2,52
2millones	AUTO	4,06	3,98	3,84	3,66	3,33	2,51
3millones	AUTO	4,06	3,98	3,83	3,66	3,33	2,51
5millones	AUTO	4,06	3,98	3,83	3,66	3,33	2,51

Tabla 4.18: Evolución de los valores de  $T_{30}$  en función del número de rayos/conos y tiempo de inspección automático, por bandas de octava

Se comprueba que el método ofrece convergencia hacia unos mismos valores pero es necesaria una gran cantidad de rayos (del orden de millones). Sin embargo, los valores alcanzados no difieren en exceso de los obtenidos con la forma automática.

A continuación hacemos el mismo ejercicio pero modificando esta vez la longitud temporal y fijando una cantidad de rayos suficiente que nos permita observar cuándo alcanzamos los valores de convergencia de la tabla anterior.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)							
<i>Rays/ Cones</i>	<i>Length (ms)</i>	125	250	500	1000	2000	4000
2millones	2000	3,56	3,53	3,46	3,37	3,17	2,5
2millones	2500	3,90	3,84	3,73	3,60	3,30	2,51
2millones	3000	4,03	3,96	3,82	3,65	3,33	2,51
2millones	3200	4,05	3,97	3,83	3,66	3,33	2,51
2millones	3400	4,06	3,98	3,83	3,66	3,33	2,51
2millones	3500	4,06	3,98	3,83	3,66	3,33	2,51
2millones	4000	4,06	3,98	3,84	3,66	3,33	2,51

Tabla 4.19: Evolución de los valores de  $T_{30}$  en función del *Length* para 2 millones de rayos/conos, por bandas de octava

Se observa que la convergencia total se produce a partir de 3400 ms aunque hacia los 3000 ms se obtienen unos valores parecidos a los del sistema automático.

#### 4.6.2 Tiempos de simulación

La simulación con la configuración automática se efectúa de forma rápida. En nuestro caso los tiempos de cálculo son despreciables (del orden de 30 segundos).

La evolución del tiempo de cálculo al aumentar el número de rayos/conos para un *Length* automático es el siguiente:



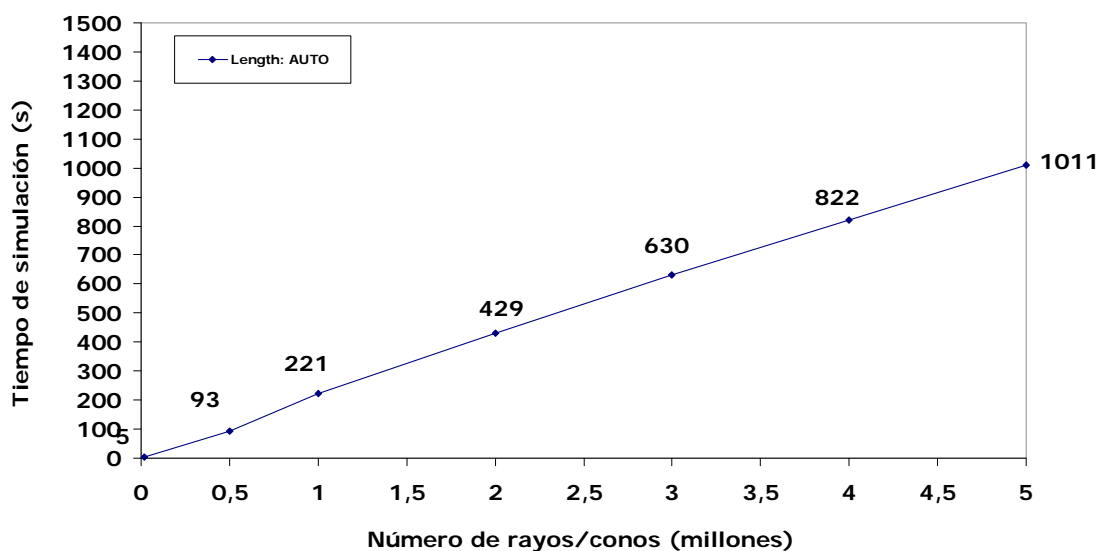


Figura 4.12: Evolución del tiempo de simulación en función del número de rayos/conos para un cálculo automático de la ventana temporal

Si el número de rayos/conos es fijo (se ha establecido en 2 millones) y se varía la ventana de inspección, el coste computacional de la simulación sigue la evolución mostrada a continuación:

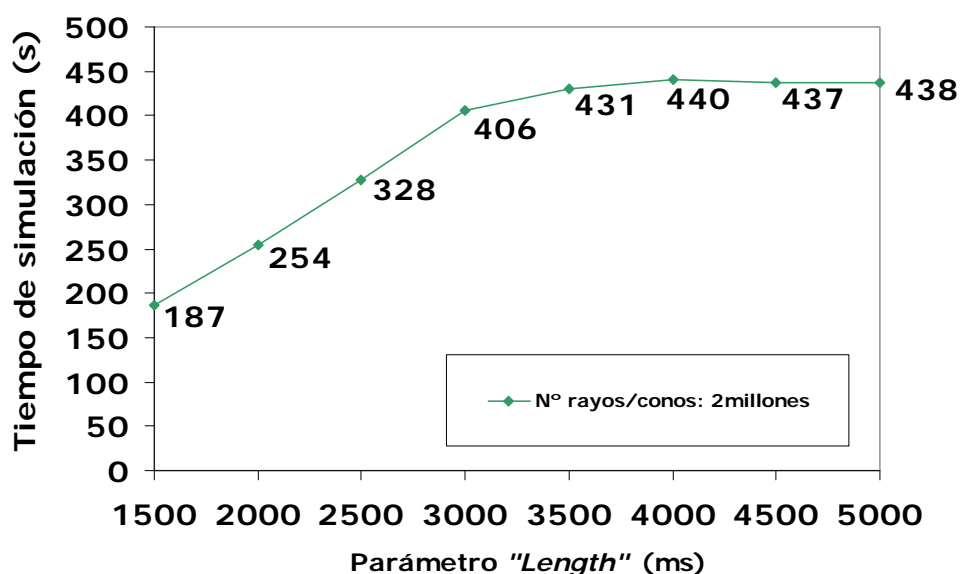


Figura 4.13: Evolución del tiempo de simulación en función del *Length* para 2 millones de rayos/conos

De la tabla anterior se aprecia que el tiempo de simulación también deja de crecer a medida que nos acercamos al tiempo para el que convergen los valores (unos 3000 ms).

### 4.6.3 Validez de resultados

En diferentes repeticiones de simulaciones con los mismos ajustes de *Length* y *Rays/Cones* este método ofrece resultados idénticos. La comparación entre el  $T_{30}$  obtenido de la Tabla 4.18 o Tabla 4.19 (el de la configuración automática no difiere demasiado) y los valores de *Sabine* y *Eyring* que calcula *CATT* (Tabla 4.2) se muestra a continuación.

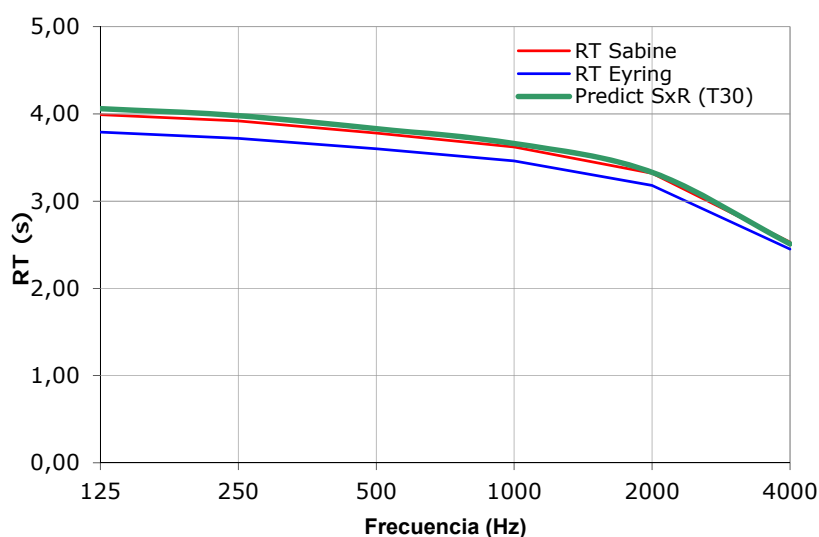


Figura 4.14: Comparación gráfica entre los valores de  $T_{30}$  del *Predict SxR* (*TUCT/CATT*), en verde, los de *Sabine* (rojo) y de *Eyring* (azul)

La representación anterior muestra que el resultado se aproxima mucho al *RT* de *Sabine*. Los valores se encuentran ligeramente por encima, en prácticamente todas las bandas de frecuencia, mientras que son notablemente más altos que los de *Eyring*.

## 4.7 Influencia de las ubicaciones de fuente y receptor

Hasta ahora, las simulaciones realizadas para analizar los diferentes métodos de *EASE* y *CATT* se han efectuado, por simplicidad, para un único punto de recepción y sin variar la ubicación de la fuente sonora de excitación. A continuación se procede a analizar qué influencia tiene sobre el *RT* el hecho de variar la posición de estos elementos. Los coeficientes de absorción del recinto así como el resto de parámetros, incluidos los ambientales, se mantienen invariables a los descritos en el apartado 4.1.3.

La rutinas *AURA* (*EASE*) y *Predict SxR* (*CATT*) analizadas anteriormente ofrecen un mejor comportamiento, resultados semejantes entre sí y cercanos a los valores teóricos de *Sabine*. Por ese motivo solo se emplearán esos métodos en las simulaciones siguientes.

### 4.7.1 Ubicaciones de la fuente sonora de excitación

Se realizan simulaciones para 2 posiciones de fuente sonora y 3 receptores distintos ya que solo nos interesa observar si existe influencia alguna en el *RT*. Además, en caso de seguir el procedimiento de medidas de la norma UNE-EN ISO 3382-2, no exige la consideración de mayor número de ubicaciones.

La figura siguiente muestra las ubicaciones de fuente y puntos de recepción considerados en los dos programas de simulación con el objetivo de observar qué influencia tienen las diferentes posiciones sobre el tiempo de reverberación estimado.

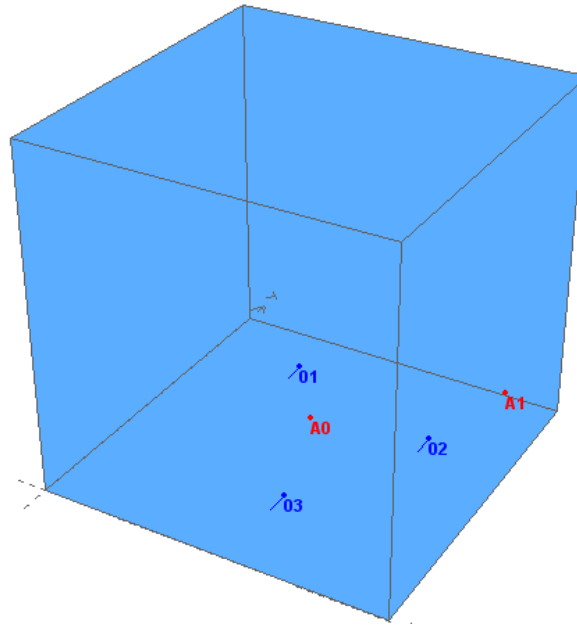


Figura 4.15: Ubicación de las distintas fuentes sonoras (en rojo) y los puntos de recepción (azul) considerados en *EASE* y *CATT*

#### 4.7.2 *RT* de las combinaciones emisor-receptor (*EASE*)

Los resultados de tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ) obtenidos con el método *AURA* para las 2 posiciones de fuente y 3 puntos receptores considerados son los siguientes:

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 octava, en Hz)							
Fuente	Receptor	125	250	500	1000	2000	4000
A0	01	4,10	4,09	4,07	3,98	3,65	2,76
A0	02	4,10	4,09	4,07	3,97	3,64	2,75
A0	03	4,11	4,10	4,08	3,99	3,65	2,76
A1	01	4,11	4,10	4,08	3,99	3,66	2,76
A1	02	4,09	4,09	4,06	3,97	3,64	2,75
A1	03	4,11	4,10	4,08	3,98	3,65	2,76

Tabla 4.20: Resultados de  $T_{30}$  para las distintas combinaciones emisor-receptor con el método *AURA* (*EASE*), por bandas de 1/3 de octava

Los resultados de A0-01 ya los teníamos del apartado anterior mientras que los restantes se han obtenido de la misma forma que en el apartado 0.

Este método no siempre arroja los mismos resultados aun repitiendo la simulación con las mismas opciones de cálculo, por lo que es difícil valorar la variación de tiempos en función de la ubicación y recepción. De todas formas los valores de la tabla son promedios de 5 realizaciones y podemos apreciar que la diferencia entre las distintas configuraciones emisor-receptor es mínima.

### 4.7.3 *RT* de las combinaciones emisor-receptor (*CATT*)

Los resultados de tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ) obtenidos con el método *Predict SxR (TUCT/CATT)* para las 2 posiciones de fuente y 3 puntos receptores considerados son los siguientes:

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)							
Fuente	Receptor	125	250	500	1000	2000	4000
A0	01	4,06	3,98	3,84	3,66	3,33	2,51
A0	02	4,07	3,99	3,84	3,67	3,33	2,52
A0	03	4,07	3,99	3,84	3,67	3,34	2,52
A1	01	4,08	3,99	3,85	3,67	3,34	2,52
A1	02	4,06	3,98	3,83	3,66	3,33	2,51
A1	03	4,08	4,00	3,85	3,68	3,34	2,52

Tabla 4.21: Resultados de  $T_{30}$  para las distintas combinaciones emisor-receptor con el método *Predict SxR (TUCT/CATT)*, por bandas de octava

Puesto que los resultados no varían con este método para unos mismos ajustes de cálculo, los valores de la tabla son los obtenidos para la convergencia de esta rutina (ver apartado 4.6.1).

Los tiempos de reverberación en función de las distintas configuraciones emisor-receptor no difieren más que en unas pocas centésimas en todas las bandas de frecuencia. Este comportamiento es el esperado ya que, con las hipótesis inicialmente enunciadas, se pretendía construir un recinto de características tales que permitieran un campo sonoro lo más difuso posible.

## 4.8 Influencia de la absorción

En este apartado se realizan simulaciones variando el coeficiente medio de absorción de la sala sin variar el resto de condiciones (4.1.3). Se considera  $\alpha$  uniforme en todas las superficies del recinto e igual para todas las bandas de frecuencia. El objetivo es simplificar el estudio y acercarse a las premisas de la formulación clásica centrándonos en evaluarlas al incrementar  $\bar{\alpha}$ .

De igual forma que en el apartado anterior se utilizan únicamente los métodos *AURA* de *EASE* y *Predict SxR* de *TUCT/CATT*. Las ubicaciones de fuente sonora y punto de recepción son las mismas que las inicialmente consideradas (Figura 4.1 y Figura 4.2; *EASE* y *CATT*, respectivamente).

### 4.8.1 *RT* en función del coeficiente de absorción (*EASE*)

La tabla siguiente muestra el resultado de las simulaciones realizadas para distintos coeficientes medios de absorción (valor  $\alpha$  igual para todas las bandas de frecuencia y superficies). El método utilizado es *AURA* y las opciones de cálculo ajustadas son las que proporcionan convergencia de valores según lo visto en [0].

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 de octava, en Hz)						
Coef. medio de absorción ( $\bar{\alpha}$ )	125	250	500	1000	2000	4000
0,05	8,42	8,39	8,29	7,92	6,73	4,24
0,15	2,67	2,66	2,65	2,61	2,47	2,02
0,25	1,50	1,50	1,49	1,48	1,43	1,27
0,35	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,89
0,45	0,72	0,72	0,72	0,72	0,71	0,67
0,55	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,51
0,65	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,40
0,75	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,31
0,85	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
0,95	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22

Tabla 4.22: Resultados de *RT* ( $T_{30}$ ) con *AURA* para distintos coeficientes medios de absorción, por bandas de 1/3 de octava

La comparación entre los resultados obtenidos para  $\bar{\alpha}= 0,05$ ;  $\bar{\alpha}= 0,15$ ;  $\bar{\alpha}= 0,55$  y los valores de *Sabine* y *Eyring* que proporciona *EASE* está representada en las figuras siguientes.

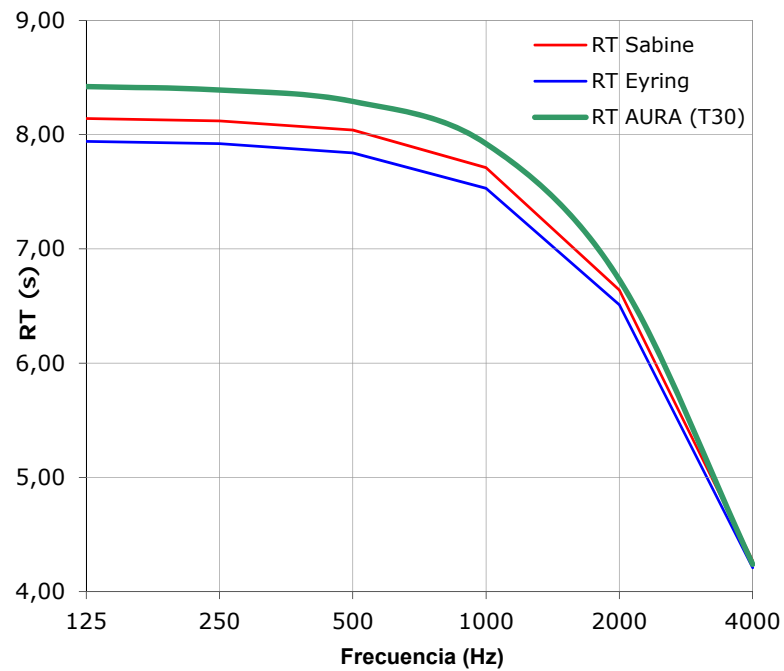


Figura 4.16: Comparación gráfica de valores de  $RT$  de *Sabine* (rojo), *Eyring* (azul) y  $T_{30}$  (verde) de *AURA* para  $\bar{\alpha}=0,05$

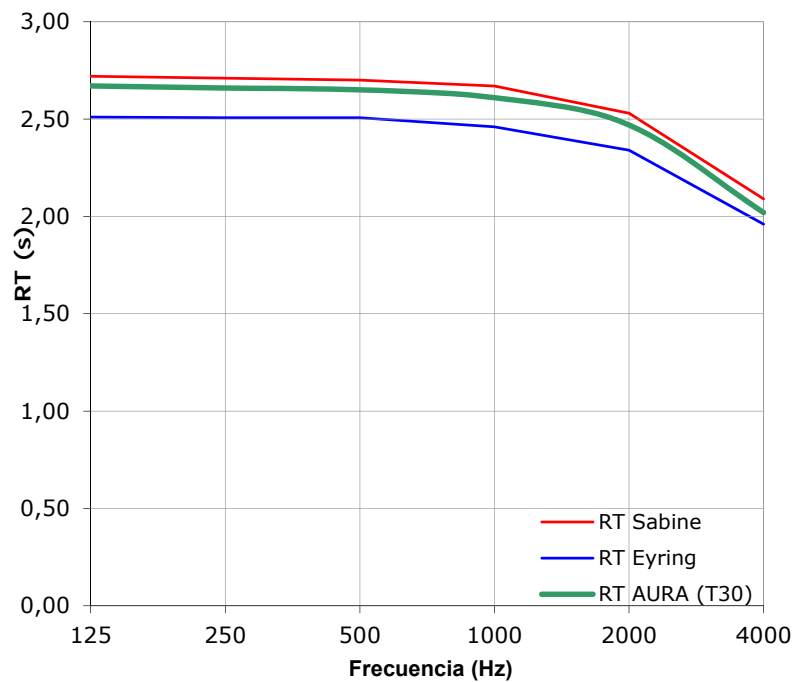


Figura 4.17: Comparación gráfica de valores de  $RT$  de *Sabine* (rojo), *Eyring* (azul) y  $T_{30}$  (verde) de *AURA* para  $\bar{\alpha}=0,15$

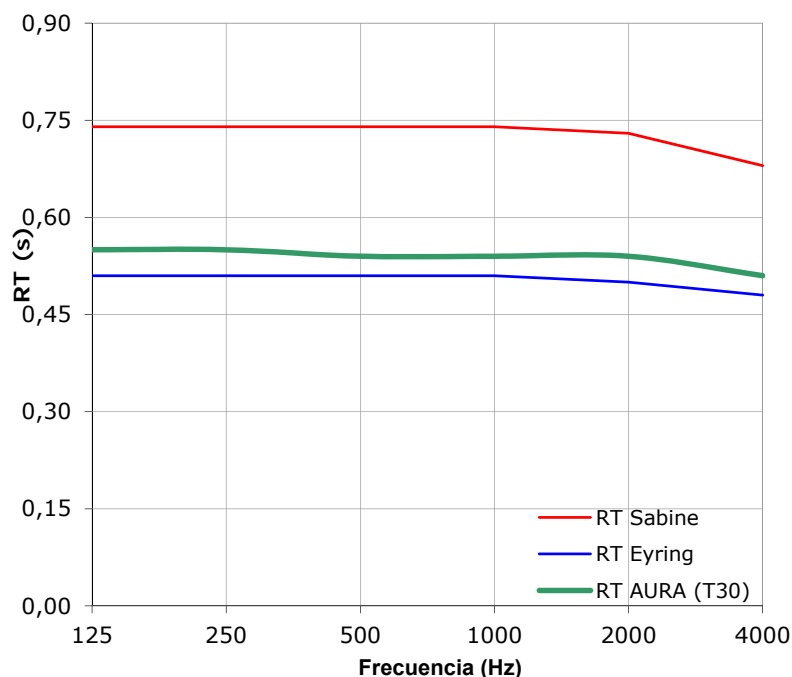


Figura 4.18: Comparación gráfica de valores de  $RT$  de *Sabine* (rojo), *Eyring* (azul) y  $T_{30}$  (verde) de *AURA* para  $\bar{\alpha}=0,55$

#### 4.8.2 $RT$ en función del coeficiente de absorción ( $CATT$ )

La tabla siguiente contiene el resultado de las simulaciones para los mismos  $\bar{\alpha}$  del apartado anterior. El método usado es el *Predict SxR* con la configuración automática. No resulta imprescindible en este apartado alcanzar una convergencia total (además no difiere en exceso de los valores de convergencia y reduce los tiempos de cálculo).

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)						
Coef. medio de absorción ( $\bar{\alpha}$ )	125	250	500	1000	2000	4000
0,05	8,23	7,91	7,35	6,74	5,68	3,68
0,15	2,62	2,59	2,53	2,46	2,32	1,89
0,25	1,49	1,48	1,46	1,44	1,38	1,21
0,35	0,98	0,97	0,97	0,95	0,93	0,85
0,45	0,71	0,71	0,70	0,70	0,69	0,65
0,55	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,50
0,65	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,40
0,75	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32
0,85	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25
0,95	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23

Tabla 4.23: Resultados de  $RT$  ( $T_{30}$ ) con *Predict SxR* (*TUCT/CATT*) para distintos coeficientes medios de absorción, por bandas de octava



Las figuras siguientes muestran el  $RT$  ( $T_{30}$ ) del *Predict SxR* (*TUCT/CATT*) en comparación con los resultados de *Sabine* y *Eyring* proporcionados por el mismo programa.

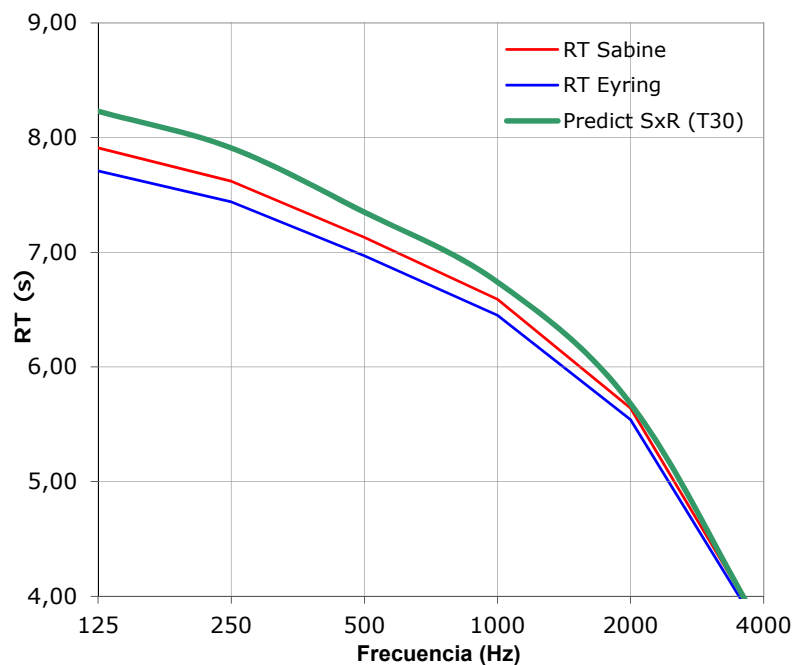


Figura 4.19: Comparación gráfica del  $RT$  de *Sabine* (rojo), *Eyring* (azul) y  $T_{30}$  del *Predict SxR* (verde) para  $\bar{\alpha}=0,05$

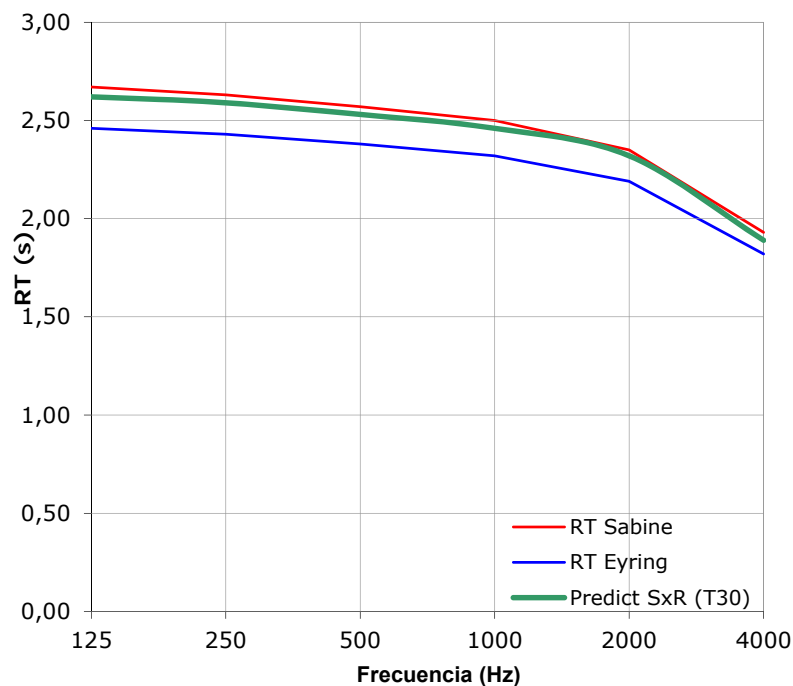


Figura 4.20: Comparación gráfica del  $RT$  de *Sabine* (rojo), *Eyring* (azul) y  $T_{30}$  del *Predict SxR* (verde) para  $\bar{\alpha}=0,15$

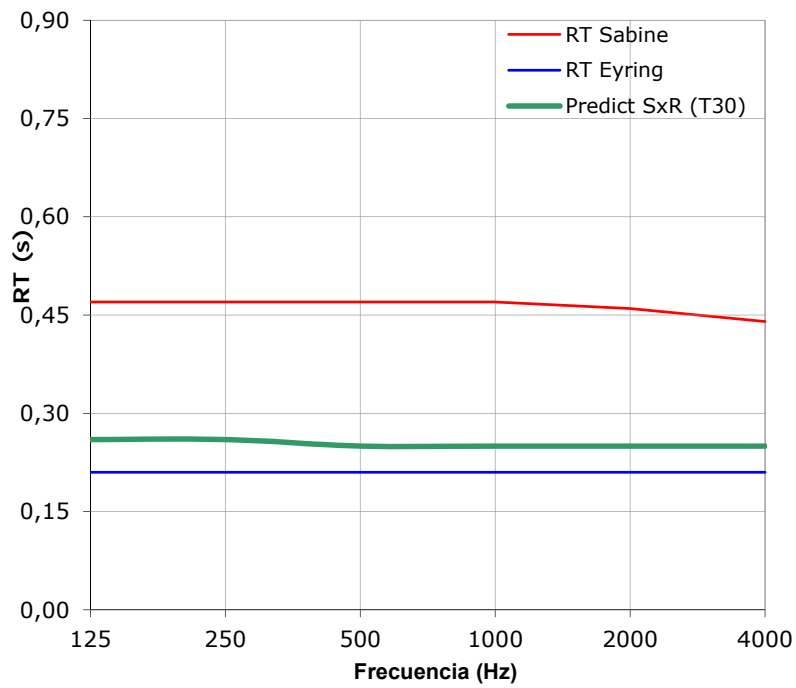


Figura 4.21: Comparación gráfica del  $RT$  de *Sabine* (rojo), *Eyring* (azul) y  $T_{30}$  del *Predict SxR* (verde) para  $\bar{\alpha}=0,85$

## 4.9 Influencia del *scattering*

El *scattering* ocurre cuando ciertos elementos o superficies del recinto tienen la capacidad de producir reflexiones dispersivas al incidir los rayos sonoros, distribuyendo la energía en múltiples direcciones. Este fenómeno está explicado en el punto [2.3.2].

Los métodos *AURA (EASE)* y *Predict SxR (TUCT/CATT)* incorporan modelos de difusión en sus algoritmos mediante la introducción de un coeficiente de *scattering* (ver 3.2.5 y 3.3.3).

En este apartado se realizan simulaciones con las dos rutinas variando este parámetro. El recinto, las condiciones ambientales y ubicaciones de la fuente sonora y receptor son los del inicio del capítulo. El coeficiente de absorción usado es de  $\bar{\alpha} = 0,05$ . Puesto que con este coeficiente hemos visto que el *RT* se situaba, en el anterior apartado, por encima del valor de *Sabine* resulta interesante comprobar si al aumentar el coeficiente de *scattering* (o sea, la difusión del campo sonoro) los resultados obtenidos se acercan a los de la expresión clásica.

### 4.9.1 Simulaciones con *scattering* en *AURA (EASE)*

La tabla siguiente muestra los resultados de tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ) en función de diferentes porcentajes de *scattering* con el método *AURA (EASE)*. Siguiendo el procedimiento realizado en [0] los ajustes de cálculo seleccionados han sido *Length*: 8000 ms y *Particles*: 200 mil.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 de octava, en Hz)						
% <i>scattering</i>	125	250	500	1000	2000	4000
10%	7,89	7,85	7,80	7,48	6,46	4,18
30%	7,87	7,83	7,76	7,45	6,42	4,17
50%	7,87	7,86	7,78	7,45	6,46	4,15
70%	7,88	7,85	7,81	7,50	6,47	4,19
90%	7,90	7,89	7,83	7,50	6,49	4,18

Tabla 4.24: Tiempos de reverberación ( $T_{30}$ ) de *AURA (EASE)* en función del *scattering* y  $\bar{\alpha}=0,05$ , por bandas de 1/3 de octava (*Length*: 8000 ms, *Particles*: 200 mil)

En la Tabla 4.24 se observa que los tiempos de reverberación son más bajos que los obtenidos sin *scattering* (ver Tabla 4.22). Por tanto, se interpreta que la difusión del campo sonoro ha cambiado con la aplicación de dispersión en las superficies pero no aumenta prácticamente (no disminuye el *RT*) al incrementar el porcentaje.

La figura siguiente compara los valores de *Sabine* y *Eyring* con los de la anterior tabla (50% de *scattering*).

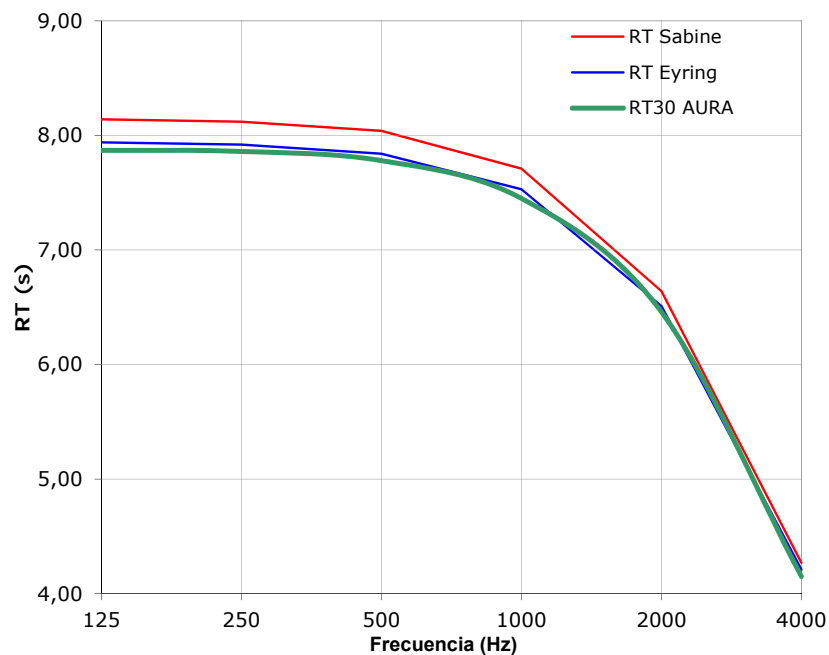


Figura 4.22: Resultados de  $RT (T_{30})$  de AURA (EASE) con un 50% de *scattering* (verde), valores de *Sabine* (rojo) y *Eyring* (azul) para  $\bar{\alpha} = 0,05$  (en 1/3 de octava)

En el gráfico se aprecia que, habiendo aplicado dispersión, los valores ya no están por encima de los de *Sabine* (como ocurría en ausencia de *scattering*) sino que más bien coinciden con los de la expresión de *Eyring*.

Los tiempos de simulación al considerar reflexiones dispersivas aumentan considerablemente. La evolución del coste computacional para los valores de *scattering* anteriormente considerados son los siguientes:

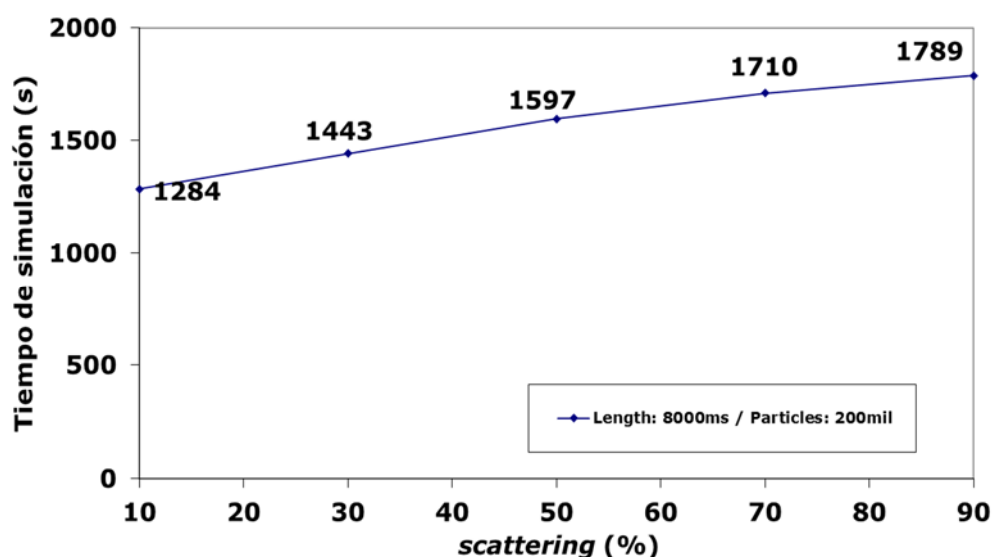


Figura 4.23: Tiempos de cálculo (en segundos) del método *AURA* (*EASE*) en función del *scattering* para el recinto sencillo ( $\bar{\alpha}=0,05$ )

Hay que destacar que con poca cantidad de *scattering* el coste computacional se eleva abruptamente respecto a las simulaciones que no tienen en cuenta dicho fenómeno (sin contemplar difusión el tiempo de cálculo es de 96 s).

#### 4.9.2 Simulaciones con *scattering* en *Predict SxR* (*TUCT*)

Cuando se consideran coeficientes de dispersión en *CATT/TUCT*, el método *Predict SxR* admite la posibilidad de realizar simulaciones mediante 3 algoritmos diferentes [134]. La diferencia entre ellos, esencialmente, consiste en el orden hasta el cual las reflexiones difusas se consideran deterministas o aleatorias (ver 3.3.1).

Puesto que el recinto que nos ocupa es sencillo se puede asumir que el uso del algoritmo 1 es suficiente [134]. Para confirmar estas suposiciones se comparan los resultados obtenidos entre el algoritmo 1 y 2 para un porcentaje de *scattering* elevado (90%). Se considera que con un valor alto los diferentes algoritmos pueden ofrecer resultados más variables (el porcentaje energético atribuido a las reflexiones dispersivas tratadas de forma determinista es elevado y puede suponer una diferencia con el tratamiento aleatorio que utiliza el algoritmo 1 con *Max split-order*=0). La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos con los algoritmos citados y las opciones de cálculo ajustadas en configuración automática.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)							
Algoritmo	<i>Max split order</i>	125	250	500	1000	2000	4000
1	0	7,74	7,50	7,04	6,52	5,58	3,67
1	1	7,77	7,49	7,00	6,51	5,58	3,66
1	2	7,78	7,51	7,04	6,50	5,57	3,66
2	-	7,76	7,48	7,02	6,49	5,57	3,67

Tabla 4.25: Resultados de  $T_{30}$  con *CATT* para distintos algoritmos, 90% de *scattering* y  $\bar{\alpha}=0,05$ , por bandas de octava para el recinto sencillo

La Tabla 4.25 muestra que los resultados para los diferentes algoritmos son muy parecidos. El algoritmo 3 no se ha tenido en cuenta por ser apropiado para auralizaciones y recintos abiertos o geometrías complejas [147]. Así pues, en nuestro caso bastará con el algoritmo 1 y *Max split-order*=0 con ajustes de cálculo automáticos (se han realizado repeticiones de simulaciones y los valores no varían en exceso).

Finalmente, se muestran los valores de *RT* ( $T_{30}$ ) obtenidos de las simulaciones realizadas con el algoritmo 1 (*Max split-order*=0) para distintos coeficientes de *scattering* (igual que con *EASE*).

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)						
% <i>scattering</i>	125	250	500	1000	2000	4000
10%	7,75	7,49	7,01	6,49	5,57	3,65
30%	7,74	7,47	6,99	6,48	5,57	3,66
50%	7,74	7,48	7,00	6,48	5,56	3,66
70%	7,75	7,49	7,01	6,49	5,57	3,66
90%	7,76	7,50	7,03	6,51	5,58	3,66

Tabla 4.26: Valores de  $T_{30}$  del *Predict SxR* (Algoritmo 1, *Max split-order*=0 y ajuste automático) en función del *scattering* y  $\bar{\alpha}=0,05$ , por bandas de octava

Los valores obtenidos han disminuido respecto a los del apartado donde no se contemplaba difusión en las superficies (ver Tabla 4.23). Vemos que, también como ocurría en *EASE*, los resultados no varían prácticamente al aumentar el *scattering* por lo que se interpreta que con un bajo porcentaje de este se alcanza un campo sonoro difuso.

El *RT* estimado para un 50% de *scattering* (por ejemplo) comparado con los tiempos de reverberación de *Sabine* y *Eyring* aparece en la figura siguiente:

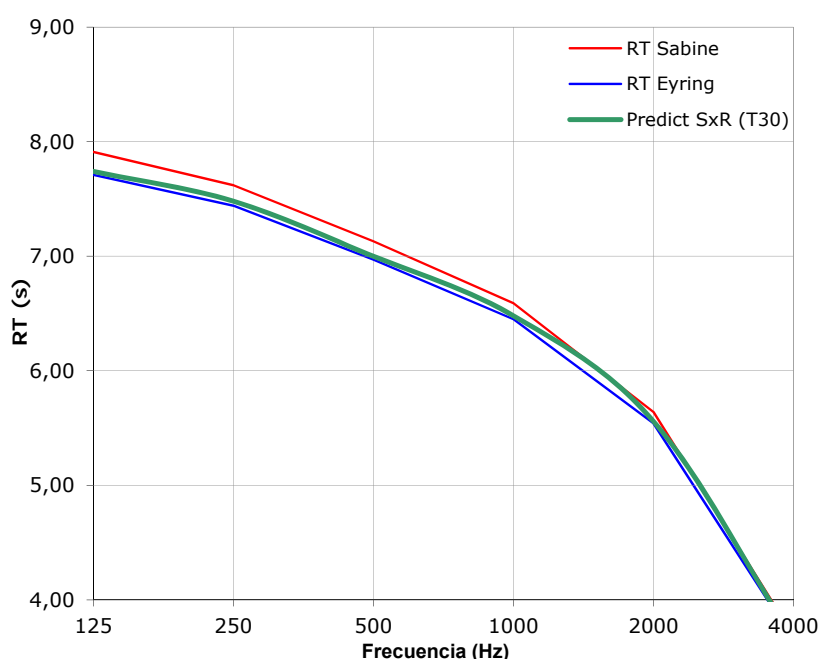


Figura 4.24: Gráfico del  $T_{30}$  (verde) del *Predict SxR* (algoritmo 1, Max split-order=0, *scattering*: 50%), RT de *Sabine* (rojo) y *Eyring* (azul) para  $\bar{\alpha} = 0,05$ , bandas de octava

En el gráfico se aprecia que el  $T_{30}$  simulado está ahora ubicado por debajo de los valores de *Sabine* y próximos a los de *Eyring* en prácticamente todas las bandas de frecuencia. Esto significa que al aplicar difusión a las superficies del recinto se consigue disminuir el tiempo de reverberación. En ausencia de *scattering*, para el mismo  $\bar{\alpha} = 0,05$ , el RT se situaba por encima de *Sabine*.

Los tiempos de cálculo necesarios para las anteriores simulaciones no aumentan significativamente respecto a la opción sin *scattering* debido al tratamiento estocástico de las reflexiones dispersivas del algoritmo 1 y *Max split-order*=0 (ver 3.3.3). En cambio, si se incrementa el citado *Max split-order*, se aprecia claramente el aumento del coste computacional. Este comportamiento se muestra en la siguiente figura.

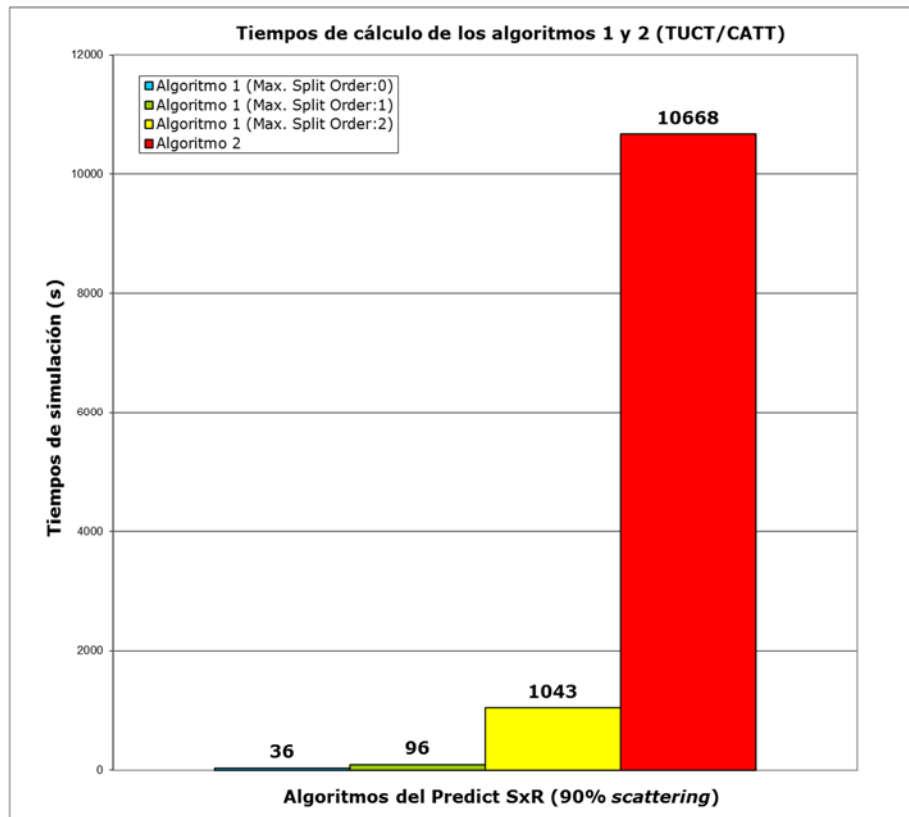


Figura 4.25: Tiempos de simulación (en s) para distintos algoritmos del *Predict SxR* (*TUCT/CATT*) con 90% de *scattering* y  $\bar{\alpha}=0,05$

El tiempo de cálculo crece de forma muy notable al utilizar el algoritmo 2. Es un comportamiento esperado, puesto que al tratar de forma determinista las reflexiones difusas para órdenes de reflexión cada vez más grandes, el crecimiento de nuevos rayos sonoros (rayos secundarios) afecta claramente al tiempo de simulación.



## 4.10 Influencia de la geometría

Hasta el momento hemos visto que las referencias de los tiempos de reverberación obtenidos mediante simulación informática respecto a los de *Sabine* y *Eyring* varían en función del parámetro de *scattering* y de  $\bar{\alpha}$ . La uniformidad de este coeficiente de absorción a lo largo de las superficies del recinto también influye sobre la difusión del campo sonoro, tal y como hemos explicado en [2.4.5]. Además, otro factor que influye y se comenta en ese mismo apartado es la geometría de la sala.

El modelo inicialmente considerado se ha realizado con el objetivo de cumplir la premisa de un recinto en el que las relaciones entre sus dimensiones no son extremas. Es de esperar que si la geometría cambia, el grado de difusión del campo sonoro se vea modificado. Asimismo es interesante observar qué sucede si las dimensiones para el recinto “regular” varían.

En este apartado únicamente se llevarán a cabo simulaciones con *TUCT* (*CATT*) dada su flexibilidad para cambiar las condiciones geométricas del modelo y el comportamiento semejante entre *AURA* y *TUCT* observado hasta el momento. Además, el interés principal radica en comparar los resultados con las ecuaciones teóricas.

### 4.10.1 Variación de las dimensiones del recinto

Supongamos el caso de la misma sala regular pero ahora con dimensiones de 30 m x 30 m x 30 m. Con el recinto iniciales, sin aplicar *scattering*, habíamos visto en el análisis del *Predict SxR* de *TUCT/CATT* que para  $\bar{\alpha}=0,10$  los valores estimados se aproximaban a *Sabine* (Figura 4.14) mientras que para  $\bar{\alpha}=0,15$  estos se situaban por debajo (Figura 4.20). La tabla siguiente muestra el *RT* para el nuevo recinto (**R2**) y el inicial (**R1**) para  $\bar{\alpha}=0,15$  y sin *scattering*, así como los valores de *Sabine* asociados a ambos recintos.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)						
Recinto (m)	125	250	500	1000	2000	4000
<b>R1: 15x15x15</b>	2,62	2,59	2,53	2,46	2,32	1,89
<b>R2: 30x30x30</b>	5,32	5,19	4,96	4,69	4,19	2,97
<i>Sabine</i> (R1)	2,67	2,63	2,57	2,50	2,35	1,93
<i>Sabine</i> (R2)	5,30	5,17	4,94	4,68	4,18	3,00

Tabla 4.27: Resultados de  $T_{30}$  del *Predict SxR* (*TUCT/CATT*) para el recinto **R1** y **R2** ( $\bar{\alpha}=0,15$ , sin *scattering*) y valores de *Sabine* asociados, por bandas de octava

Vemos que en el recinto mayor (R2) se consigue que para  $\bar{\alpha}=0,15$  los resultados sean casi iguales que los de *Sabine* (como sucedía en el recinto inicial (R1) para  $\bar{\alpha}=0,10$ ). En ausencia de *scattering* observamos que, al aumentar las dimensiones del recinto, los valores han aumentado respecto a *Sabine* para el mismo coeficiente de absorción. Como ya se ha comentado anteriormente se interpreta que en un recinto de más volumen es más patente el hecho de no tener un campo totalmente difuso (sucede igualmente si, en lugar de aumentar las dimensiones de la sala, se disminuye la absorción).

Si aplicamos un 10% de *scattering* de tal forma que el campo sonoro en la sala presente una buena difusión y comparamos los valores obtenidos en el recinto inicial (R1), en el (R2) y los resultados de *Sabine* y *Eyring* asociados a cada uno de ellos para  $\bar{\alpha}=0,05$  se obtiene lo siguiente.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)						
Recinto (m)	125	250	500	1000	2000	4000
R1: 15x15x15	7,75	7,49	7,01	6,49	5,57	3,65
R2: 30x30x30	15,25	14,23	12,58	10,93	8,57	4,76
<i>Sabine</i> (R1)	7,91	7,62	7,13	6,59	5,64	3,69
<i>Eyring</i> (R1)	7,71	7,44	6,97	6,45	5,54	3,65
<i>Sabine</i> (R2)	15,60	14,50	12,80	11,20	8,70	4,80
<i>Eyring</i> (R2)	15,20	14,10	12,60	11,00	8,60	4,80

Tabla 4.28: Valores de  $T_{30}$  del *Predict SxR* (TUCT/CATT) para el recinto R1 y R2 ( $\bar{\alpha}=0,05$ , 10% de *scattering*) y RT de *Sabine*/*Eyring* asociados, por bandas de octava

En esta ocasión, al introducir un 10% de *scattering* la relación de los resultados con los respectivos valores de las expresiones clásicas no varía de forma apreciable para el coeficiente medio de absorción considerado. Se observa que, aunque las dimensiones de la sala hayan aumentado, al aplicar difusión, continuamos obteniendo unos resultados que se aproximan a *Eyring*, tal y como habíamos visto en 4.9.2 (sucede lo mismo si, en estas mismas condiciones, en lugar de aumentar las dimensiones de la sala se disminuye el coeficiente de absorción).

#### 4.10.2 Variación de la geometría del recinto

A continuación consideramos una sala (R3) de igual volumen pero con unas proporciones irregulares. Al igual que en el punto anterior, únicamente se ha utilizado el método *Predict SxR* de TUCT/CATT. El recinto en cuestión y las ubicaciones de fuente sonora, así como el punto de recepción considerado se muestra en la figura siguiente:

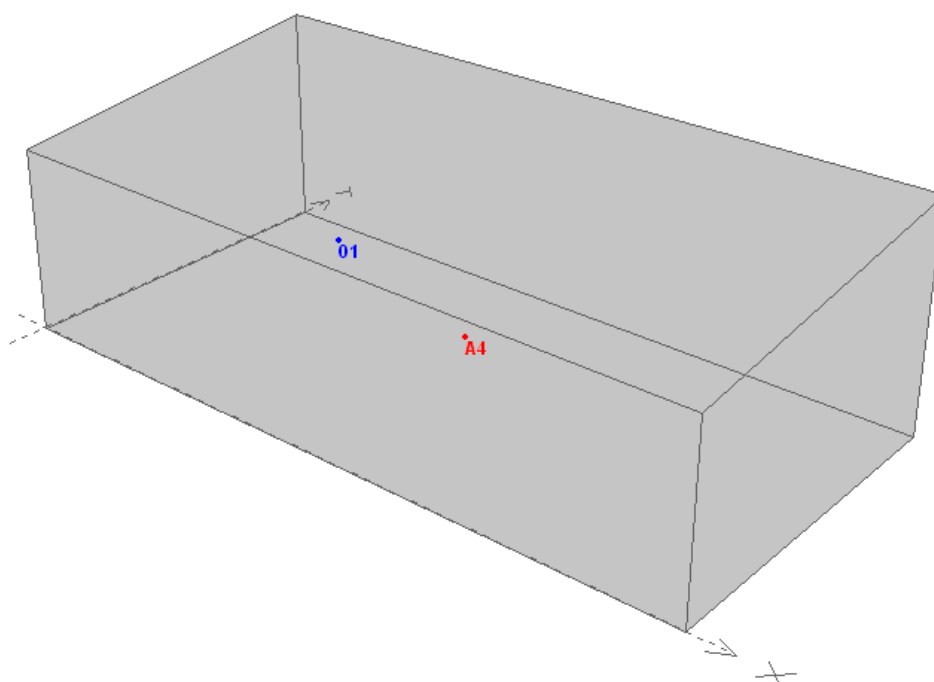


Figura 4.26: Vista del modelo del recinto irregular (R3) realizado en CATT

Las simulaciones realizadas tienen el objetivo de verificar el grado de difusión del campo sonoro que proporciona la geometría de este nuevo recinto, en comparación con el ya analizado (R1). Como hemos comentado anteriormente, la referencia respecto a *Sabine* nos servirá para evaluar esta cuestión.

La tabla siguiente muestra los resultados de  $RT$  ( $T_{30}$ ) obtenidos con el *Predict SxR* (*TUCT/CATT*) en R3 para un  $\bar{\alpha}=0,05$  (sin considerar *scattering*), los valores ya obtenidos para la sala inicial R1 (ver Tabla 4.23) y el  $RT$  asociado a *Sabine*.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)						
Recinto (m)	125	250	500	1000	2000	4000
R1: sala regular	8,23	7,91	7,35	6,74	5,68	3,68
R3: sala irregular	11,11	10,45	9,44	8,09	6,22	3,66
<i>Sabine</i> (R1)	7,91	7,62	7,13	6,59	5,64	3,69
<i>Sabine</i> (R3)	7,00	6,78	6,39	5,95	5,16	3,48

Tabla 4.29: Valores de  $T_{30}$  del *Predict SxR* (*TUCT/CATT*) para el recinto R1 y R3 ( $\bar{\alpha}=0,05$ , sin *scattering*) y  $RT$  de *Sabine* asociados, por bandas de octava

Se puede apreciar entre los dos recintos que, para el caso de sala irregular (R3), los valores de  $RT$  ( $T_{30}$ ) se elevan mucho más, comparativamente, que en el caso de la sala inicialmente considerada (R1) para el mismo coeficiente medio de absorción. De ello se extrae que la sala

con la relación de dimensiones más extrema (sala alargada y techo bajo) produce un campo sonoro mucho menos difuso que el del recinto R1.

Si realizamos el ejercicio de aplicar diferentes porcentajes *scattering* al nuevo recinto (misma absorción que antes) obtenemos la siguiente tabla de tiempos de reverberación.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)						
% scattering	125	250	500	1000	2000	4000
10%	7,13	6,87	6,49	6,03	5,24	3,52
30%	6,90	6,67	6,31	5,90	5,13	3,46
50%	6,86	6,65	6,27	5,87	5,11	3,46
70%	6,89	6,66	6,29	5,87	5,10	3,46
90%	6,89	6,66	6,29	5,88	5,11	3,45

Tabla 4.30: Valores de  $T_{30}$  del *Predict SxR* (*TUCT/CATT*) para el recinto R3 ( $\bar{\alpha}=0,05$ ), en función de distintos porcentajes de *scattering*, por bandas de octava

La tabla anterior muestra que para el recinto irregular (R3), a partir de 30%, los tiempos de reverberación parecen no varían en exceso. Si examinamos los valores obtenidos en esta misma situación para el recinto inicial (Tabla 4.26) vemos que, desde el porcentaje inicial de difusión, ya se apreciaba cierta convergencia. Esto confirma que, efectivamente, la nueva geometría influye en el grado de difusión del campo sonoro y, en consecuencia, sobre las referencias respecto a las expresiones clásicas. Si además no se hubiera considerado absorción uniforme a lo largo de las distintas superficies este fenómeno habría sido aún más evidente (especialmente diferente  $\alpha$  en las paredes respecto al techo/suelo).

En situaciones de absorción no uniforme la aplicación de difusión se antoja como una buena solución si se requiere disminuir el tiempo de reverberación. Si una superficie provoca *scattering* distribuye más equitativamente la energía sonora a lo largo de todo el recinto, aprovechando de un mejor modo las superficies más absorbentes.

## 5 Resultados de *RT. Sala Polivalent*

### 5.1 Introducción

En este capítulo se analiza el tiempo de reverberación de una sala real (*Sala Polivalent* de Reus) obtenido de las simulaciones con *EASE* y *CATT*.

Las situaciones planteadas hasta el momento no son frecuentes en la realidad y la mayoría de los recintos presentan características que los alejan de las premisas en las que se sustentan las ecuaciones de *Sabine* y *Eyring*. Así pues, resulta interesante comparar los valores de *RT* ofrecidos por los dos programas al simular un recinto real y discutir la validez respecto a las expresiones clásicas.

Asimismo, con el objetivo de disponer de una referencia añadida, se realizan también mediciones *in situ* de *RT* en el recinto propuesto y, de esta forma, comparar los resultados obtenidos con los que ofrecen *EASE* y *CATT*.

### 5.2 Métodos de medición *in situ* de *RT*

La respuesta impulsional es una de las medidas más importantes que se pueden adquirir de un recinto. A través de la misma pueden ser calculados muchos parámetros acústicos como el tiempo de reverberación o el *RASTI* (inteligibilidad de la palabra) [153]. A continuación se describen algunos de los métodos más usados para obtener la respuesta impulsional de una sala.

#### 5.2.1 Método del sonido impulsivo

Consiste en adquirir la respuesta impulsional  $h(t)$  del recinto mediante una excitación sonora de corta duración y elevado nivel de energía. Puesto que este procedimiento pretende aproximar la señal generada a la función  $\delta(t)$ , la respuesta impulsional se obtiene de forma directa.

En ocasiones estas fuentes sonoras pueden ser el sonido de una palmada, la explosión de un globo [154], pistolas de fogeo [155] o petardos pero no producen una buena repetitividad, provocando en cada experimento la excitación de diferentes bandas frecuenciales. Otro problema es que muchas de estas fuentes no producen suficiente nivel sonoro comprometiendo la relación señal/ruido (*SNR*) y siendo necesarios una cantidad elevada de promediados [156] [157] [158]. Además, puesto que la duración de la excitación es demasiado corta comparada con el tiempo de registro de la respuesta del recinto (necesario para adquirir

información de baja frecuencia) [156], esta región espectral es más vulnerable al ruido.

La reproducción de un sonido impulsional mediante un sistema altavoz es otra posibilidad pero además de que siguen presentes algunos problemas anteriores, estos dispositivos son más susceptibles a ser dañados ante este tipo de señales y a generar distorsión en los equipos, que operarían en una zona no lineal afectando a las medidas realizadas [156] [159].

### 5.2.2 Método *Maximum Length Sequence (MLS)*

Este método está basado en la excitación sonora del recinto mediante una señal producida por una secuencia periódica pseudoaleatoria que tiene prácticamente las mismas características estocásticas que el ruido blanco [160] [161]. La longitud de la secuencia viene dada por:

$$L = 2^m - 1 \quad [5-1]$$

$L$ : número de muestras en un periodo

$m$ : orden de la secuencia MLS (número de registros digitales)

La señal *MLS* proviene de la función  $x[n]$  que está formada por muestras de  $m$  bits de tamaño y se generan mediante realimentación de registros de desplazamiento (*shift registers*) [162].

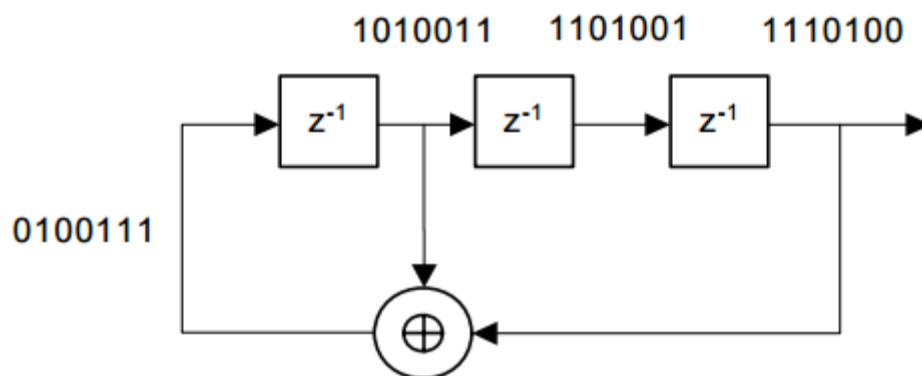


Figura 5.1: Esquema de generación de secuencia pseudoaleatoria con registros de desplazamiento realimentados ( $n=3$  y  $L=7$ )

La autocorrelación  $R_{xx}$  de dicha función se asemeja a la función  $\delta(n)$ . Si la señal obtenida del sistema es  $y[n] = x[n] * h[n]$ , tenemos que [163]:

$$R_{xy}[n] = R_{xx}[n] * h[n] \approx \delta[n] * h[n] = h[n] \quad [5-2]$$

$R_{xy}$ : correlación entre la señal MLS  $x[n]$  y la señal obtenida del sistema  $y[n]$

$h[n]$ : función de transferencia (respuesta impulsional) del sistema

Puesto que la secuencia *MLS* es periódica realmente se aplica una convolución circular, por lo que la respuesta impulsional es [164]:

$$h'[n] = \sum_{i=-\infty}^{i=\infty} h[n + iL] \quad [5-3]$$

$h'[n]$ : función de transferencia circular

$h[n]$ : función de transferencia

$L$ : longitud de la secuencia MLS (muestras por periodo)

El cálculo computacional para la obtención de la respuesta impulsional en el proceso de deconvolución de la señal recibida se ve simplificado mediante el método *FHT* (*Fast Hadamard Transform*) [165].

Un primer inconveniente de este método se advierte de la ecuación anterior. La longitud de la secuencia no debe ser menor que la duración de la respuesta impulsional del recinto para no introducir errores producidos por *time-aliasing*. Si traducimos este requisito al entorno analógico, en función de la frecuencia de muestreo utilizada, tenemos que:

$$L = t_h \cdot f_m \quad [5-4]$$

$L$ : longitud de la secuencia MLS (número de muestras por periodo)

$f_m$ : frecuencia de muestreo de la conversión D/A

$t_h$ : duración de la respuesta impulsional del recinto

Este método presenta una buena inmunidad a muchos tipos de ruido ya que estos no están correlados con la señal de excitación, sin embargo, pueden aparecer picos de distorsión asociados a no linealidades de los sistemas de medición [164]. Estos inconvenientes pueden disminuirse haciendo uso de la técnica *IRS* (*Inverse Repeated Sequence*) [166].

### 5.2.3 Método ESS (barrido frecuencial exponencial)

Este método proviene del barrido frecuencial lineal, también denominado *TDS* (*Time Delay Spectrometry*) [167] pero en este caso el barrido de frecuencia sigue una ley exponencial. La señal de excitación se puede describir mediante la siguiente expresión:

$$x(t) = \sin\left[\frac{T w_1}{\ln(\frac{w_2}{w_1})} \left(e^{\frac{t}{T} \ln(\frac{w_2}{w_1})} - 1\right)\right] \quad [5-5]$$

$w_1$ : frecuencia inicial del barrido

$w_2$ : frecuencia final del barrido

$T$ : duración total del barrido

En el espacio frecuencial esta señal se asemeja al ruido rosa al presentar un decaimiento de 3 dB/octava [159].

La creación de una función inversa que, convolucionada con la señal de excitación da como resultado la función  $\delta(t)$ , permite en el proceso de deconvolucion obtener la respuesta impulsional a partir de la señal registrada o medida [168].

En el procedimiento descrito anteriormente las distorsiones armónicas son fácilmente identificables y se pueden separar de la parte lineal de la respuesta. Esta propiedad es una de las ventajas del método *ESS* [169], consiguiendo con ello alcanzar una mayor *SNR* respecto al método *MLS* [170]. Además, con esta técnica se evitan posibles situaciones de *time-aliasing* [164].

Con el objetivo de minimizar los transitorios al inicio y al final de la reproducción de la señal de excitación y obtener una respuesta frecuencial con menos abruptos se usa *fade in* y *fade out* en la señal *ESS* [171]. Esto es, incrementar y disminuir gradualmente el nivel de la misma al inicio y final, respectivamente, al reproducir dicha señal. En el dominio temporal esto supone un enventanado de la señal que origina algunos inconvenientes que pueden ser subsanados a través de ciertas técnicas [172].



## 5.3 Medición de *RT*. *Sala Polivalent*

### 5.3.1 Presentación de la *Sala Polivalent*

La *Sala Polivalent* está ubicada en la ciudad de Reus (Tarragona) y se encuentra integrada en un espacio llamado *La Palma*. El acceso se realiza a través del *Passeig de Mata, 4*.

La sala está destinada a albergar diferentes actividades aunque se utiliza sobre todo para actuaciones musicales con música amplificada. El aforo es de 400 personas. A continuación se muestran algunas fotografías.



Figura 5.2: Vista del escenario de la *Sala Polivalent* de Reus



Figura 5.3: Vista desde el escenario de la *Sala Polivalent* de Reus

### 5.3.2 Condiciones de medición en la sala

Los datos y las condiciones ambientales más relevantes existentes durante las mediciones del tiempo de reverberación llevadas a cabo en la *Sala Polivalent* son los que figuran a continuación:

- Fecha de las mediciones: 28/09/16
- Ocupación de la sala: sala vacía
- Temperatura: 24°C
- Humedad relativa: 70%
- Ruido de fondo: ninguna fuente externa de ruido apreciable

### 5.3.3 Equipos y protocolo de medición del *RT*

Para la realización de las mediciones de tiempo de reverberación en la *Sala Polivalent* se ha utilizado como fuente de excitación un recinto acústico omnidireccional [22] *CESVA BP012* que funciona con el amplificador/generador de ruido *CESVA AP600*. La captación de la respuesta del recinto se ha efectuado con un micrófono omnidireccional *Behringer ECM8000*. Las especificaciones de estos equipos se pueden ver en el anexo. La generación y el procesado de las señales se ha llevado a cabo con un ordenador portátil *ASUS A53E* con el *software* de medición

ARTA [173] y una tarjeta de sonido *TASCAM US-366*. El esquema de interconexión de los diferentes equipos es el mostrado en la figura siguiente:

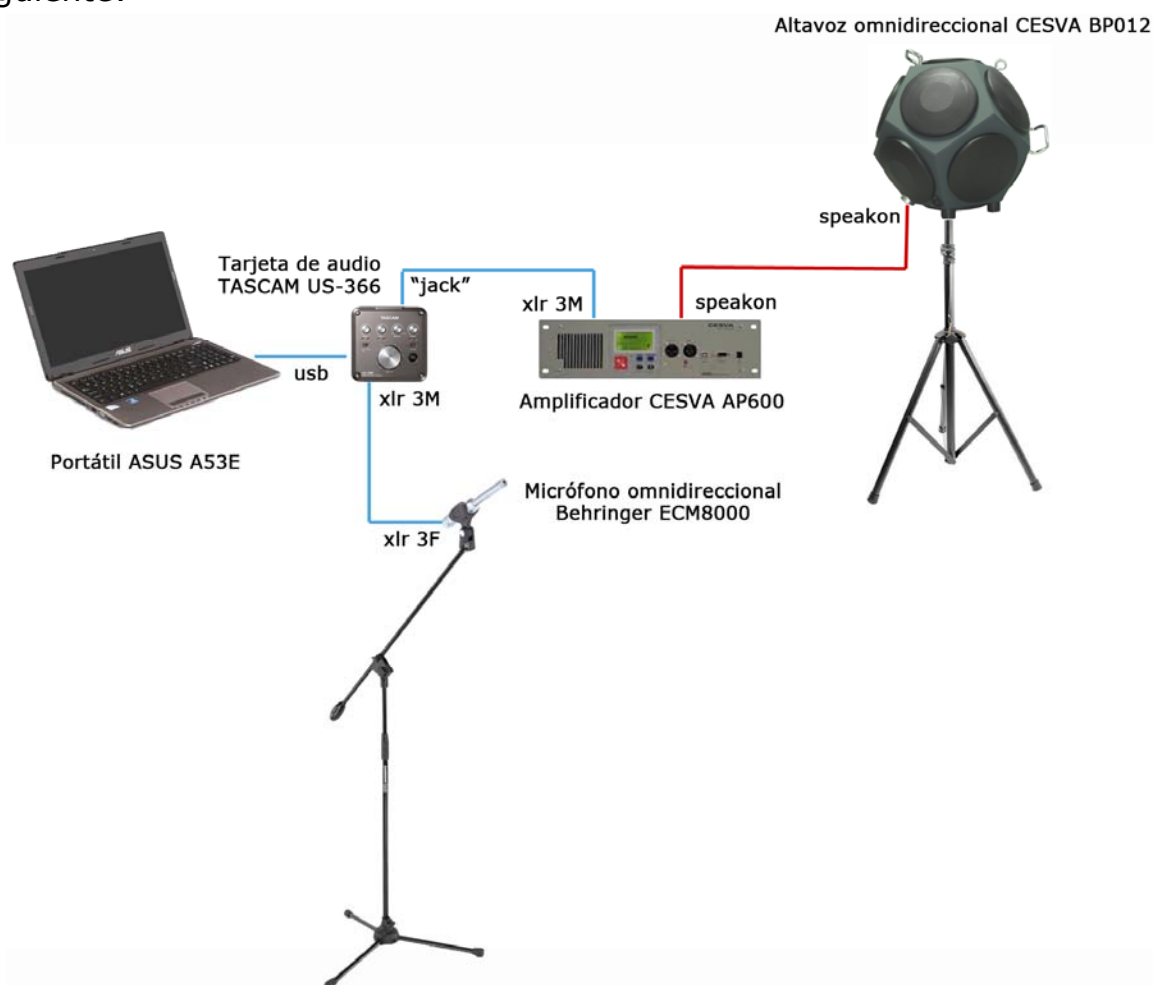


Figura 5.4: Esquema de interconexión de los equipos destinados a la medición del  $RT$  de la Sala Polivalent

El sistema de medición utilizado se basa en la excitación del recinto con una señal acústica de banda ancha consistente en un barrido frecuencial exponencial o *ESS*. Se ha seleccionado este método por ser el que presenta más ventajas, tal y como se ha comentado en el apartado 5.2.

La citada señal se genera mediante el *software ARTA* y se reproduce mediante los dispositivos de la Figura 5.4 para excitar el recinto. El mismo programa informático se encarga de procesar la señal captada por el micrófono y obtener la respuesta impulsional, así como distintos parámetros de tiempo de reverberación calculados según el método de *Schröder*.

Debido a las posibles variaciones del sonido de excitación inherentes a los equipos electrónicos, el programa realiza 3 mediciones en cada una de las posiciones de micrófono contempladas y calcula el promedio.

### 5.3.4 Posiciones de fuente sonora y puntos de medición

La figura siguiente muestra las distintas ubicaciones de fuente sonora y posiciones de micrófono (ver apéndice para una mejor visualización e información de cotas). Los diferentes puntos escogidos pretenden ser representativos del espacio total pero también cubrir aquellas zonas que tengan en cuenta las principales influencias susceptibles de ser origen de diferencias en el tiempo de reverberación a lo largo de la sala.

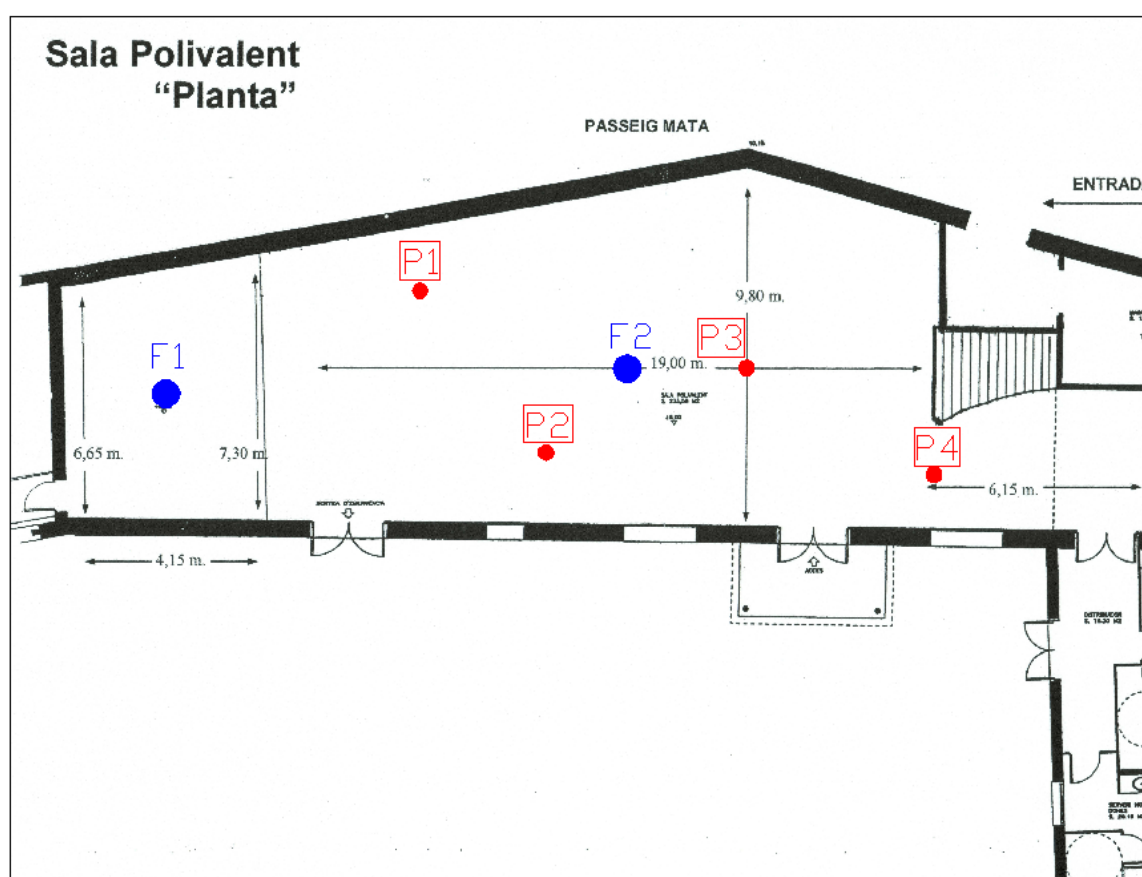


Figura 5.5: Posiciones de fuente sonora y micrófonos de las mediciones de RT en la Sala Polivalent

Se realizan mediciones en 4 puntos de la sala (P1-P4) para 2 posiciones de fuente diferentes (F1, F2). Esta cantidad de combinaciones cumple con los requerimientos del llamado método de ingeniería de la norma UNE-EN ISO 3382. La distancia mínima de la ubicación del micrófono respecto a las superficies límite, posición de fuente sonora y el resto de posiciones de medición cumple también con las especificaciones que se encuentran en la citada norma.

### 5.3.5 Resultados de $RT$

En este apartado se muestran los valores de tiempo de reverberación obtenidos con el sistema de medición anteriormente expuesto. El parámetro presentado es el  $T_{30}$  para facilitar la comparación con los datos estimados por *AURA (EASE)* y *Predict SxR (CATT)*.

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos de  $T_{30}$  en las diferentes ubicaciones contempladas (ver figura), por bandas de octava.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)							
Posición Fuente	Posición micrófono	125	250	500	1000	2000	4000
F1	P1	2,17	1,91	1,90	1,77	1,50	1,19
F1	P2	2,00	1,94	1,73	1,60	1,46	1,27
F1	P3	2,00	2,00	1,85	1,69	1,50	1,25
F1	P4	2,12	1,86	1,63	1,40	1,33	1,18
F2	P1	2,31	1,99	2,23	2,38	2,21	1,64
F2	P2	1,84	1,75	1,98	2,14	2,33	1,70
F2	P3	2,00	1,80	1,88	2,30	2,03	1,62
F2	P4	2,20	1,77	1,61	1,63	1,53	1,26

Tabla 5.1: Valores de  $RT$  ( $T_{30}$ ) obtenidos en las distintas posiciones con el sistema de medición presentado, por bandas de octava

La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos de  $T_{30}$  en las diferentes ubicaciones contempladas, por bandas de tercio de octava.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 de octava, en Hz)							
Posición Fuente	Posición micrófono	125	250	500	1000	2000	4000
F1	P1	2,38	1,88	1,64	1,79	1,51	1,17
F1	P2	2,18	2,04	1,69	1,64	1,49	1,30
F1	P3	1,84	1,77	1,76	1,76	1,53	1,27
F1	P4	2,17	1,77	1,72	1,42	1,36	1,17
F2	P1	1,93	1,90	1,82	2,64	2,38	1,63
F2	P2	1,93	1,66	1,87	2,14	2,59	1,67
F2	P3	1,92	1,74	1,78	2,48	2,16	1,60
F2	P4	1,92	1,59	1,59	1,78	1,66	1,25

Tabla 5.2: Valores de  $RT$  ( $T_{30}$ ) obtenidos en las distintas posiciones con el sistema de medición presentado, por 1/3 de octava

## 5.4 Simulación de la *Sala Polivalent*

### 5.4.1 Construcción del modelo en *AutoCAD*

El modelo de la sala construido para la simulación del tiempo de reverberación mediante *EASE* y *CATT* se ha realizado utilizando la información de planos del recinto y también tomando medidas de las distintas superficies en el mismo espacio. La figura siguiente muestra una imagen del modelo dibujado en *AutoCAD*.

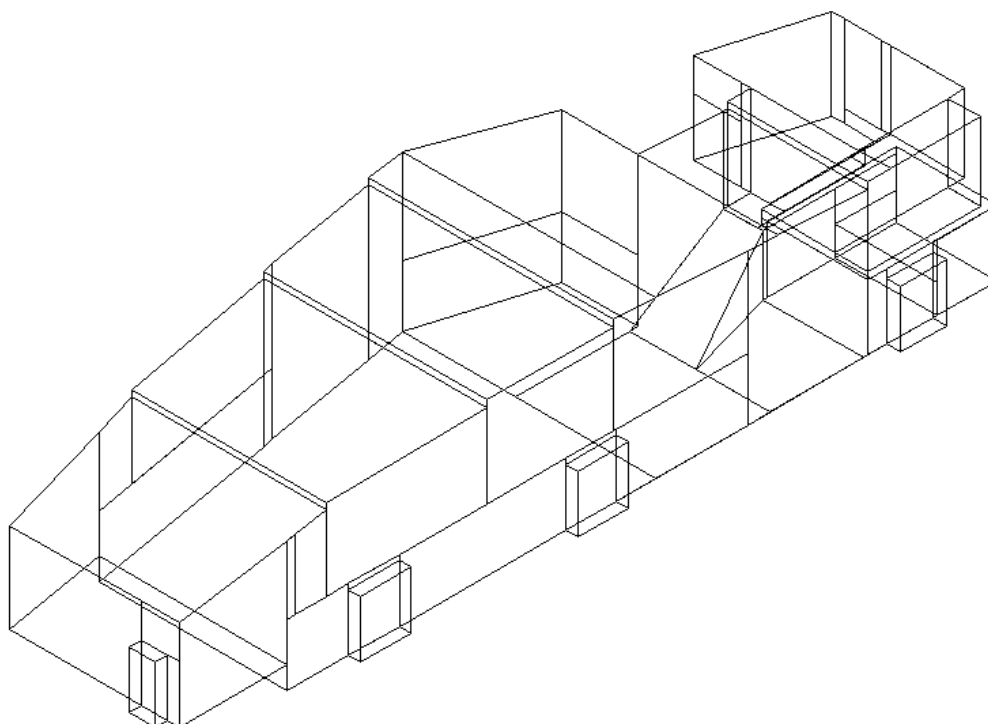


Figura 5.6: Vista en perspectiva del modelo realizado en *AutoCAD*

### 5.4.2 Materiales y coeficientes de absorción y difusión

Los elementos constructivos que componen el recinto son los siguientes:

- Puertas de acceso y de emergencia/cortafuegos (de acero selladas)
- Pavimento: Terrazo
- Escenario: Tarima maciza sobre rastreles
- Paredes: Enlucido de cemento rugoso
- Cortinas: Terciopelo plisadas a 5 cm aproximadamente de la pared
- Falso techo: paneles de aglomerado de madera (gran cavidad de aire hasta el techo)

Los materiales utilizados en las simulaciones para caracterizar los anteriores elementos constructivos y sus coeficientes de absorción, por



bandas de octava, son los siguientes (en *EASE* se ha utilizado la función de interpolación que incorpora el programa para obtener los coeficientes por bandas de tercio de octava).

<b>Coeficientes de absorción de los materiales de la <i>Sala Polivalent</i> (bandas de octava, en Hz)</b>							
<b>Elemento</b>	<b>Material</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
Puertas acceso	Puerta [174]	0,15	0,10	0,06	0,08	0,10	0,05
Puertas emergencia	Acero 50 mm sellada [175]	0,21	0,27	0,32	0,34	0,36	0,39
Pavimento	Terrazo [175]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Escenario	Tarima madera 22mm [176]	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Paredes	Enlucido cemento rugoso [177]	0,02	0,02	0,06	0,08	0,04	0,05
Cortinas	Terciopelo 18oz plisadas 50% [178]	0,16	0,35	0,55	0,66	0,70	0,66
Falso techo	Aglomerado 8mm + 30 mm aire [174]	0,25	0,20	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabla 5.3: Coeficientes de absorción de los materiales, por bandas de octava, usados en las simulaciones de *RT* de la *Sala Polivalent*

Tanto en *EASE* como en *CATT* se ha aplicado en las simulaciones un coeficiente de *scattering* del 10% para todos los materiales. Este porcentaje corresponde al valor apropiado por defecto en recintos con superficies en su mayoría lisas [151].

### 5.4.3 Datos del modelo y *RT* estadístico (*EASE*)

A continuación se muestra una vista en perspectiva del modelo de la sala introducido en *EASE* con los puntos de recepción y de fuente sonora.

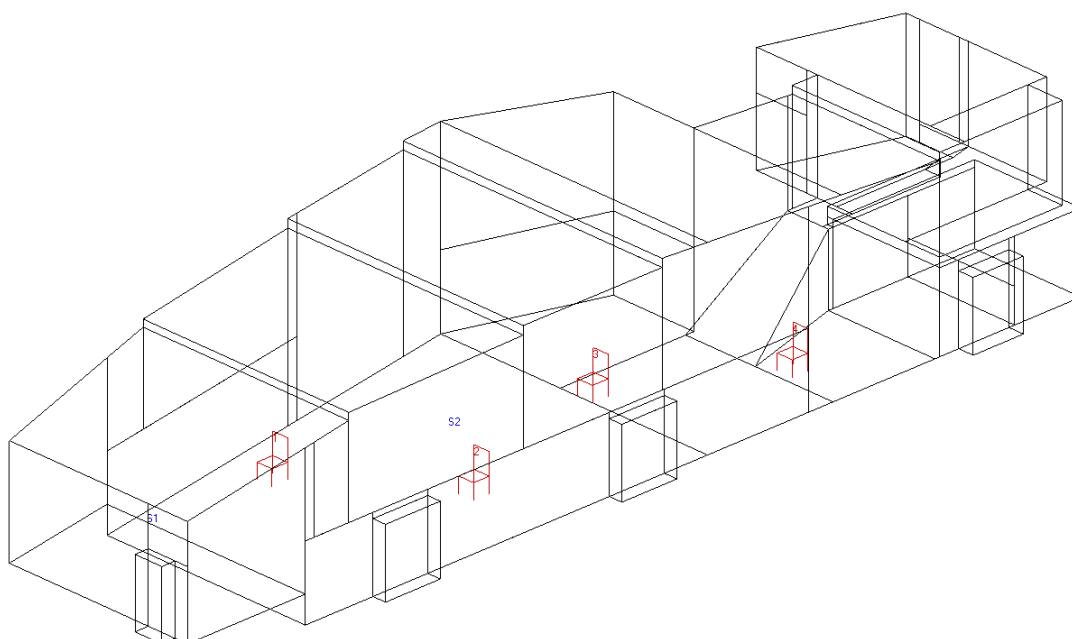


Figura 5.7: Vista del modelo de la *Sala Polivalent* en *EASE* y ubicaciones de fuente sonora y puntos de recepción

La información sobre la geometría y los datos estadísticos que proporciona este programa es la siguiente:

- Volumen: 1320,82 m<sup>3</sup>
- Superficie total: 1002,74 m<sup>2</sup>
- Libre camino medio: 5,27 m
- Libre tiempo medio: 0,02 s

Los valores de tiempo de reverberación de *Sabine* y *Eyring*, por bandas de tercio de octava, usando los coeficientes de absorción del apartado anterior en las correspondientes superficies y con las condiciones ambientales registradas el día de la medición *in situ* son los siguientes:

Frecuencias centrales 1/3 octava (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
<i>RT de Sabine (Sala Polivalent), en s</i>	2,03	1,71	1,62	1,33	1,30	1,22
<i>RT de Eyring (Sala Polivalent), en s</i>	1,92	1,60	1,51	1,22	1,20	1,13

Tabla 5.4: Tiempos de reverberación de *Sabine* (rojo) y *Eyring* (azul) de la *Sala Polivalent* calculados por *EASE*, por 1/3 de octava



#### 5.4.4 Resultados de *RT* con *AURA (EASE)*

En este apartado se presentan los valores del tiempo de reverberación estimados con el método *AURA* de *EASE* que, como hemos visto en el capítulo anterior, ofrece unos resultados más fiables que las otras rutinas existentes en el programa.

La tabla siguiente muestra los tiempos de reverberación ( $T_{30}$ ), por bandas de tercio de octava, obtenidos con *AURA* para las posiciones de fuente y recepción consideradas en las mediciones (Figura 5.7).

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 de octava, en Hz)							
Posición Fuente	Posición micrófono	125	250	500	1000	2000	4000
F1	P1	2,14	1,76	1,74	1,52	1,51	1,36
F1	P2	2,19	1,95	1,83	1,53	1,50	1,37
F1	P3	2,19	1,81	1,77	1,58	1,56	1,34
F1	P4	2,16	1,82	1,78	1,58	1,50	1,34
F2	P1	2,15	1,75	1,77	1,51	1,49	1,36
F2	P2	2,28	1,82	1,84	1,57	1,52	1,40
F2	P3	2,15	1,80	1,79	1,57	1,50	1,34
F2	P4	2,20	1,88	1,83	1,54	1,50	1,36

Tabla 5.5: Tiempos de reverberación ( $T_{30}$ ) de *AURA (EASE)* en los distintos puntos y para las posiciones de fuente consideradas, por 1/3 de octava

A continuación se presenta una tabla con los valores globales de *RT* (promediados) procedentes de las mediciones y de las simulaciones con *AURA* para las 2 posiciones de fuente consideradas, así como los resultados de *Sabine* y *Eyring* de la *Sala Polivalent* calculados por el programa.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (1/3 de octava, en Hz)						
Método	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Sabine (EASE)</i>	2,03	1,71	1,62	1,33	1,30	1,22
<i>Eyring (EASE)</i>	1,92	1,60	1,51	1,22	1,20	1,13
Global medición (F1)	2,08	1,93	1,78	1,62	1,44	1,22
Global <i>AURA</i> (F1)	2,18	1,86	1,79	1,56	1,52	1,35
Global medición (F2)	2,09	1,83	1,92	2,11	2,03	1,55
Global <i>AURA</i> (F2)	2,21	1,83	1,82	1,56	1,50	1,37

Tabla 5.6: Valores de *RT* de la *Sala Polivalent*, de las ecuaciones clásicas, promediados de las mediciones y de *AURA* (2 posiciones de fuente), por 1/3 de octava

### 5.4.5 Datos del modelo y *RT* estadístico (*CATT*)

A continuación se muestran unas vistas del modelo de la *Sala Polivalent* introducido en *CATT* y las ubicaciones de fuente y recepción consideradas.

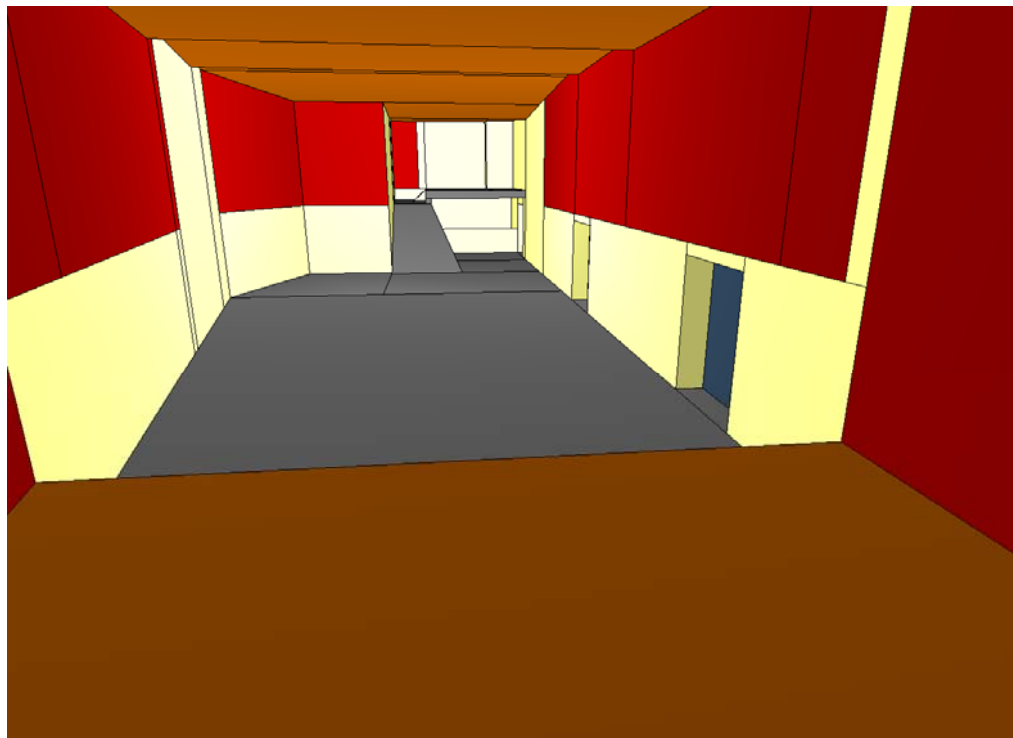


Figura 5.8: Vista interior del modelo de la *Sala Polivalent* construido en *CATT*

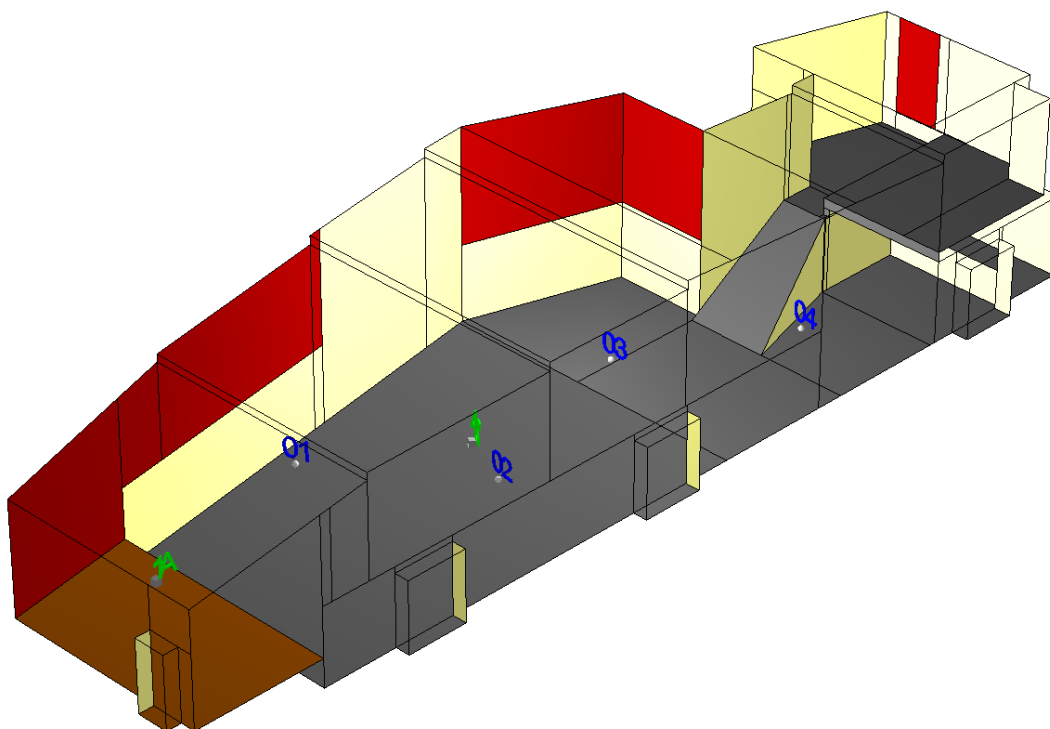


Figura 5.9: Vista de las posiciones de fuente sonora y recepción en el modelo de *CATT*

La información que proporciona este programa respecto a la geometría y los datos estadísticos es la siguiente:

- Volumen: 1376 m<sup>3</sup>
- Libre camino medio: 5,49 m
- Frecuencia de corte de *Schröder*: 80 Hz (validez de la acústica geométrica a partir de 250 Hz)

Los valores de tiempo de reverberación de *Sabine* y *Eyring*, por bandas de octava, usando los coeficientes de absorción del apartado 5.4.2 en las correspondientes superficies y con las condiciones ambientales registradas el día de la medición *in situ* son los siguientes:

Frecuencias centrales octavas (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
<i>RT de Sabine (Sala Polivalent), en s</i>	2,06	1,79	1,66	1,43	1,31	1,22
<i>RT de Eyring (Sala Polivalent), en s</i>	1,95	1,68	1,55	1,33	1,21	1,14

Tabla 5.7: Tiempos de reverberación de *Sabine* (rojo) y *Eyring* (azul) de la *Sala Polivalent* calculados por *CATT*, por bandas de octava

#### 5.4.6 Resultados de *RT* con *Predict SxR (TUCT)*

En este apartado se presentan los valores del tiempo de reverberación estimados con el método *Predict SxR* de *CATT/TUCT*. Al tratarse de un recinto cerrado es suficiente el uso del algoritmo 1 para estimar el *RT* [134]. De todas formas se ajusta un *Max split-order*= 2 para considerar reflexiones difusas deterministas hasta el orden máximo que permite esta opción. Además se seleccionan: *Length: auto* y *Rays/cones*: 100 mil.

Las posiciones de fuente sonora y puntos de recepción coinciden con los de la medición realizada *in situ* (Figura 5.9).

La tabla siguiente muestra los tiempos de reverberación (*T*<sub>30</sub>), por bandas de octava, obtenidos con el mencionado algoritmo en las distintas posiciones y ubicaciones de fuente contempladas.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)							
Posición Fuente	Posición micrófono	125	250	500	1000	2000	4000
F1	P1	2,05	1,87	1,76	1,56	1,41	1,35
F1	P2	2,03	1,84	1,80	1,66	1,44	1,34
F1	P3	2,07	1,76	1,78	1,62	1,46	1,36
F1	P4	2,07	1,90	1,83	1,62	1,46	1,30
F2	P1	2,13	1,90	1,77	1,61	1,46	1,32
F2	P2	2,09	1,87	1,74	1,56	1,47	1,31
F2	P3	2,11	1,83	1,77	1,59	1,43	1,31
F2	P4	2,16	1,95	1,78	1,56	1,44	1,31

Tabla 5.8: Tiempos de reverberación ( $T_{30}$ ) del *Predict SxR (CATT)* (algoritmo 1, *Max split-order: 2*) en las posiciones de recepción y de fuente consideradas, por bandas de octavas

Para facilitar la comparación y disponer de un valor global del tiempo de reverberación de la sala se presentan a continuación los resultados promediados del *RT* de las simulaciones y de las mediciones para las dos posiciones de fuente consideradas, así como los valores de *RT* de *Sabine* y *Eyring* proporcionados por el programa.

Tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), en s (octavas, en Hz)						
Método	125	250	500	1000	2000	4000
<i>Sabine (CATT)</i>	2,06	1,79	1,66	1,43	1,31	1,22
<i>Eyring (CATT)</i>	1,95	1,68	1,55	1,33	1,21	1,14
Global medición (F1)	2,08	1,93	1,78	1,62	1,44	1,22
Global <i>CATT</i> (F1)	2,06	1,84	1,79	1,62	1,44	1,34
Global medición (F2)	2,09	1,83	1,92	2,11	2,03	1,55
Global <i>CATT</i> (F2)	2,12	1,89	1,77	1,58	1,45	1,31

Tabla 5.9: Valores de *RT* de la *Sala Polivalent* de las ecuaciones clásicas, promediados de las mediciones y de *CATT* (2 posiciones de fuente), por bandas de octava

## 6 Conclusiones

En este capítulo se emiten las reflexiones y conclusiones extraídas durante la elaboración del presente documento. Los apartados realizados corresponden a distintas áreas tratadas en el trabajo.

### 6.1 Simulación con *EASE* y *CATT*

En este apartado se plasman las conclusiones relacionadas con los dos programas de simulación estudiados.

#### 6.1.1 Interfaz y funcionalidad

La interfaz de *EASE* se presenta en un formato más amigable que la de *CATT* aunque la primera se torna más complicada al disponer de una mayor cantidad de menús y opciones. Respecto al manejo del modelo diseñado, si bien *EASE* funciona de forma más gráfica, *CATT* es más flexible ya que se pueden definir, mediante código, variables, sentencias condicionales, etc. (como en un lenguaje de programación). Esto permiten modificar la geometría del recinto, valores de coeficiente de absorción y/o *scattering*, entre otras posibilidades, en función de las necesidades.

#### 6.1.2 Rutinas y ajustes de cálculo

Como se puede comprobar en los apartados correspondientes ([3.2] y [3.3]) *EASE* dispone de más rutinas aunque también tiene más parámetros ajustables que dificultan su uso y distinguir la funcionalidad de cada uno de ellos resulta en ocasiones confuso. *CATT*, en cambio, ofrece más claridad en este aspecto.

La misma situación ocurre con el funcionamiento de los algoritmos en *EASE*, los cuales se describen de forma superficial. Además, el acceso a unos mismos algoritmos a través de diferentes opciones del menú del programa supone una complicación añadida. Los algoritmos de *CATT* se describen con más profundidad.

Los valores provenientes de las expresiones clásicas que se muestran en las ventanas correspondientes de ambos programas tampoco coinciden, aun calculando los mismos datos estadísticos de libre tiempo y camino medios. Esto se debe a que la expresión que utiliza *EASE* para el cálculo de este *RT* no tiene en cuenta los datos ambientales introducidos en el programa. Además, la absorción calculada asociada al aire no es la misma

en los dos *softwares* (ver [4.1.4]). La discrepancia en los resultados se acusa más cuanto menor es  $\alpha$  ya que el tiempo de permanencia de los rayos sonoros en el recinto es más elevado. En *EASE* la atenuación es más moderada, obteniéndose resultados algo más elevados que en *CATT* para coeficientes de absorción bajos. Cabe mencionar que la contribución de la absorción producida por el aire se puede obviar en *CATT* pero no en *EASE* (al menos en la versión utilizada en este trabajo).

Otra diferencia destacable en lo referido a la estimación del tiempo de reverberación es el uso de bandas de tercio de octava en *EASE* frente a las bandas de octavas que utiliza *CATT*.

### 6.1.3 Convergencia de resultados

Según el resultado de las simulaciones con los distintos métodos de *EASE* y *CATT* todas las rutinas disponibles del primer programa arrojan valores diferentes de *RT*, aun repitiendo una misma simulación con idénticos ajustes de cálculo. Este comportamiento no es extraño teniendo en cuenta la naturaleza estocástica del trazado de rayos (ver [3.1.3]). En cambio, en la rutina *Predict SxR* de *CATT* se obtiene el mismo resultado si no cambian los parámetros ajustables (esto sucede únicamente cuando el algoritmo utilizado no trata reflexiones difusas).

El *Local Decay Time* de *EASE* se ha descartado para la estimación de *RT* al no ofrecer convergencia alguna, a pesar de seleccionar una ventana temporal más allá del tiempo de reverberación esperado (ver 4.2.1).

Aunque para el resto de rutinas de *EASE* y las que contemplan *scattering* en *CATT* no hay una convergencia a un valor concreto, sí que hay una tendencia a alcanzar unos valores estables, cuanto más nos acercamos al tiempo de reverberación esperado mediante el ajuste de la ventana temporal.

De lo observado en el resultado de las simulaciones, tanto *Ray Tracing Impacts* como *AURA* de *EASE* tienden a estabilizarse a partir de que el parámetro *Delay/Time* se sitúa entre 2/3 y 3/4 del *RT* esperado según *Sabine*. Únicamente aparece estabilidad total en ambas rutinas si se ajusta el parámetro temporal al total de la duración de la respuesta esperada en el recinto. Como ya hemos visto en algunos métodos de *EASE*, el parámetro *Order* también deberá ser ajustado coherentemente según lo visto en [4.2.1]. En el caso del *Predict SxR* de *CATT* alcanzamos convergencia a un valor concreto para un *Length* (tiempo de inspección) de 0,85 veces el *RT* esperado. Cabe mencionar que la obtención de unos resultados estables va

asociado, en ambos programas, a tener una cantidad de rayos suficientemente alta. Esta cantidad dependerá de la duración de la respuesta del recinto considerado. La observación de reflectogramas o ecogramas es una buena indicación de la densidad de rayos sonoros detectados en un punto a lo largo de la ventana temporal seleccionada. Las figuras siguientes son un ejemplo de dos reflectogramas obtenidos con el *Local Ray Tracing/Ray Tracing Impacts (EASE)*.

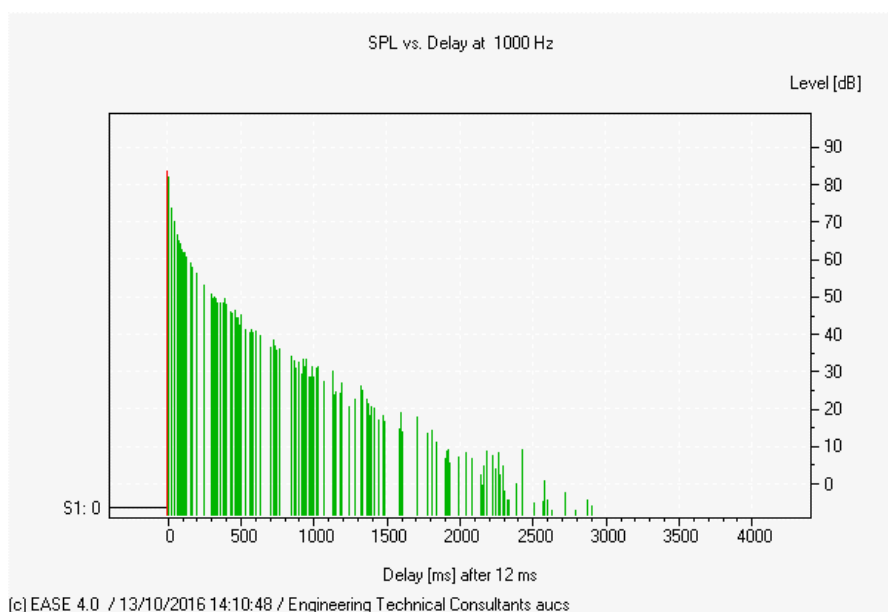


Figura 6.1: Reflectograma para 1000 Rays, Delay: 4000 ms del Ray Tracing Impacts (RT a 1 kHz: 3,56 s; RT Schröder a 1 kHz: 2,26 s). Recinto sencillo

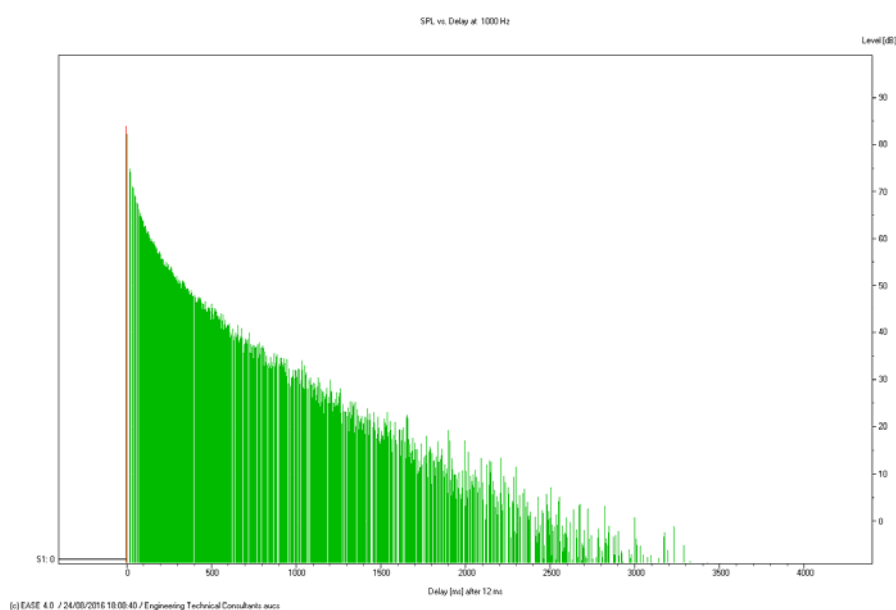


Figura 6.2: Reflectograma para 10 mil Rays, Delay: 4000 ms Ray Tracing Impacts (RT a 1 kHz: 3,66 s; RT Schröder a 1 kHz: 2,24 s). Recinto sencillo

Aunque las figuras muestren una tendencia parecida, los valores de *RT* pueden ser ligeramente diferentes y la variabilidad de los resultados al repetir una misma simulación será mayor en el primer caso. No obstante, si aplicamos el método de *Schröder* las discrepancias serán menos evidentes.

#### 6.1.4 Tiempos de simulación

Los tiempos de simulación en *EASE* son proporcionales al número de superficies existentes en el modelo del recinto [179]. De las simulaciones realizadas se aprecia que todas las rutinas doblan el coste computacional al doblar el número de rayos seleccionados para la fuente de excitación. En cambio, la evolución del tiempo de cálculo presenta una tendencia exponencial en las rutinas *Local Decay Time* y *Local Ray Tracing/Ray Tracing Impacts* mientras que en *AURA* es lineal.

En *CATT/TUCT*, el tiempo de cálculo es proporcional al número de rayos implicado pero, al aumentar la longitud temporal de la ventana de inspección, tiende a estabilizarse y no aumentar a partir de cierto valor de *Length*. Esto es un buen indicador también de que los resultados convergen.

#### 6.1.5 Validez de resultados

En vista de los valores obtenidos con los diferentes métodos, los que presentan una mayor proximidad a los resultados de las ecuaciones clásicas para el recinto sencillo considerado son las rutinas de *AURA* (*EASE*) y *Predict SxR* (*CATT*).

El *Local Decay Time* (*EASE*) se descarta al no presentar convergencia apreciable mientras que con el *Local Ray Tracing/Tracing Impacts* (*EASE*) se obtienen unos valores demasiado bajos (en caso de usar el cálculo de *Schröder* en esta rutina aún disminuyen más). El resultado, teniendo en cuenta que no existe difusión en estas rutinas y la absorción no es alta, debería estar próximo a *Sabine*, por encima de este (no idealidad de campo difuso del modelo creado) o en todo caso, entre este y *Eyring* (si se considera que  $\bar{\alpha}=0,10$  es un valor alto para encontrarnos en las hipótesis de *Sabine*). El hecho que esta rutina no proporcione los resultados esperados, que tanto *AURA* como *Predict SxR* si ofrecen, nos hace pensar que el algoritmo quizás no es suficientemente eficiente para registrar una buena cantidad de reflexiones tardías sin la utilización de una enorme cantidad de rayos a costa de unos tiempos prohibitivos.



También hay que tener en cuenta que tanto en *AURA* (*EASE*) como en *Predict SxR* (*CATT*) se ha optado por obtener el *RT* mediante el parámetro  $T_{30}$  (ver [2.2.4]), siendo necesario ajustar un tiempo de inspección que permita disponer del margen dinámico que este indicador requiere. De lo contrario, los resultados obtenidos no resultan tan fiables en *EASE* puesto que se tiene que hacer uso de la información estadística de cola reverberante del método de *Schröder*. En este caso, los parámetros *EDT*,  $T_{10}$  o  $T_{20}$  serían menos problemáticos pero no son los indicadores de interés en este trabajo.

Como ejemplo se muestran los ecogramas de 2 simulaciones realizadas con *AURA* para el recinto sencillo considerado con ventanas temporales distintas y el margen dinámico disponible en cada uno de ellos para evaluar el  $T_{30}$ .

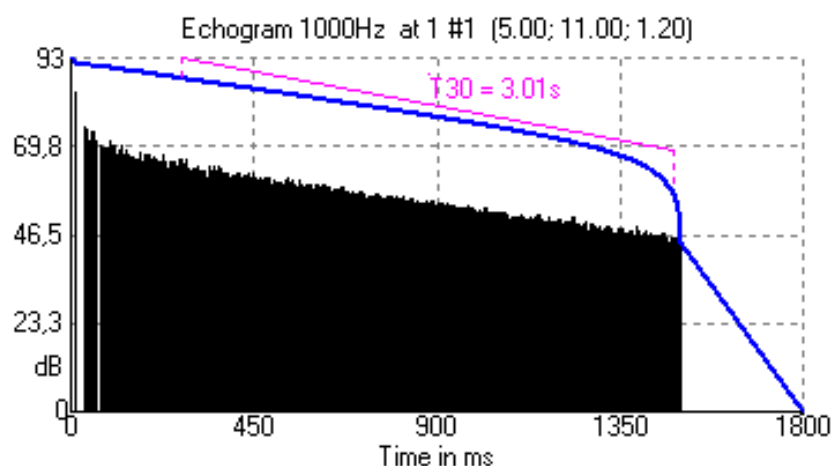


Figura 6.3: Ecograma del método *AURA* y evaluación del  $T_{30}$  sobre la curva de *Schröder* (azul) para un tiempo de 1500 ms y 500 mil partículas (recinto sencillo)

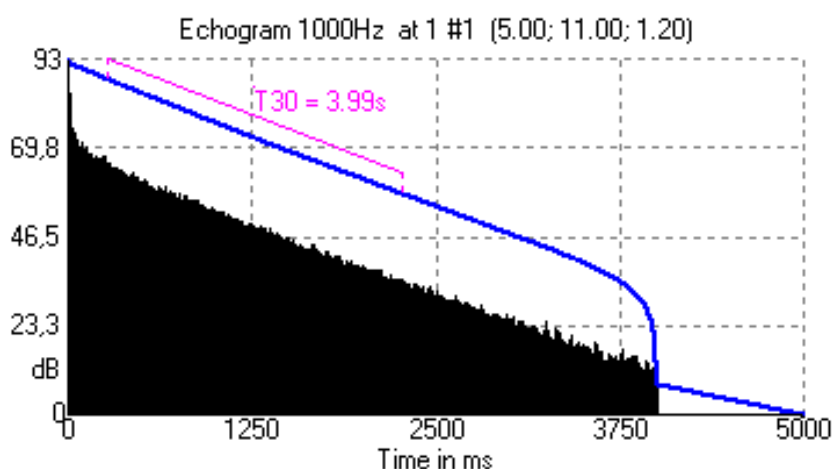


Figura 6.4: Ecograma del método *AURA* y evaluación del  $T_{30}$  sobre la curva de *Schröder* (azul) para un tiempo de 4000 ms y 500 mil partículas (recinto sencillo)

## 6.2 Simulación vs formulación clásica

Las rutinas de los dos *softwares* muestran la misma tendencia en la simulación del recinto sencillo. Inicialmente para  $\bar{\alpha} = 0,05$ , el valor de *RT* se sitúa claramente por encima del de *Sabine* y *Eyring* en prácticamente todas las bandas de frecuencia pero para un coeficiente de absorción de 0,15 ya encontramos un resultado que se ubica por debajo de *Sabine* y por encima de *Eyring*. En ambos programas, al incrementar  $\bar{\alpha}$  los valores de *RT* se acercan a *Eyring*.

Este comportamiento es el esperado puesto que la expresión de *Sabine* (tal y como se explica en 2.4.5) es válida para absorciones bajas. Así pues, a medida que el coeficiente  $\bar{\alpha}$  aumenta, *Sabine* deja de ser una referencia ya que nos alejamos de la citada premisa. Para absorciones bajas, el *RT* estimado debería acercarse al de la ecuación clásica pero esto no sucede porque el grado de difusión del campo sonoro adquiere relevancia.

Por otro lado, el concepto de “absorción baja” para cumplir con los requerimientos de un recinto tipo *Sabine* es algo impreciso. No se puede definir ningún coeficiente medio de absorción para el cual esta ecuación teórica sea válida puesto que influyen las dimensiones del recinto o el grado de difusión que proporcione la geometría de la sala. Así pues, es más acertado entender los resultados de las expresiones clásicas como una referencia más que como un valor “verdadero” de *RT*. Más bien nos sirven de indicación y confirmación de la difusión sonora existente en la sala, de cuan extremas son las proporciones del recinto o cómo de uniforme es la distribución de la absorción a lo largo de las distintas superficies.

En ocasiones puede suceder que el resultado de las simulaciones coincida con la expresión de *Sabine*. No obstante esto se debe valorar con precaución puesto que esa coincidencia puede deberse a que la baja difusión o poca homogeneidad de los materiales absorbentes (que situarían el *RT* por encima de *Sabine*) se verían compensados por un coeficiente medio de absorción elevado (requerimiento inválido según las hipótesis de dicha formulación). En la mayoría de recintos reales, el *RT* se moverá desde valores por encima de *Sabine* (recintos con absorción no muy alta o campo sonoro muy poco difuso) hasta aproximarse a *Eyring* (cuanto mayor sea la absorción o la difusión en la sala). Parece habitual en situaciones no muy extremas que el *RT* se encuentre entre los resultados de las dos expresiones teóricas.

## 6.3 Mediciones

Los resultados de  $RT$  obtenidos de la simulación de la *Sala Polivalent* con el método de *CATT* se aproximan bastante a los valores medidos para la posición de fuente F1 (valores globales promediados). La máxima diferencia ocurre para 4 kHz. Esto podría ser debido a que la absorción de las cortinas fuera realmente más alta que lo que indica el coeficiente de absorción del material utilizado en la simulación para esa frecuencia. Para la misma ubicación de fuente, el método *AURA (EASE)* presenta unos resultados no tan cercanos a las mediciones pero sin alejarse en exceso. A parte de las diferencias en los algoritmos, cabe recordar también la diferente evaluación que hace *EASE* de la absorción del aire (esto es apreciable a altas frecuencias). Además, por debajo de 250 Hz deben valorarse los resultados con precaución (validez del modelo geométrico, ver 0).

Los resultados medidos para la posición de fuente F2 difieren bastante respecto a los obtenidos en las simulaciones con ambos programas. En las mediciones de las posiciones P1 a P3, las bandas comprendidas entre 500 Hz a 2 kHz incrementan el valor de  $RT$  considerablemente. Esto puede ser debido a un conjunto de problemas geométricos que las simulaciones no han reflejado. De hecho, en la sala se apreciaba un sonido tipo efecto rebote propio del *Flutter Echo* [143].

Se ha procedido a disminuir el valor de *scattering* al 2% en *CATT* con el objetivo de realzar las reflexiones especulares que puedan mostrarnos este fenómeno. Seleccionando además el algoritmo 2 para la posición P1 (F2) se obtiene la tendencia siguiente:



Figura 6.5: Gráfico de RT del *Predict SxR* (CATT/TUCT) para la posición de fuente F2 (receptor P1) con el algoritmo 2 y *scattering* 2%

En la figura anterior se puede ver un pico a 500 Hz que en anteriores simulaciones no se apreciaba aunque la tendencia es decreciente para 1 kHz i 2 kHz.

Otra posibilidad de observar este tipo de fenómenos es recurrir a la respuesta impulsional. Mediante el programa *EASERA* se registraron las respuestas impulsionales en todos los puntos. La respuesta impulsional correspondiente a la posición P1 (F2) es la siguiente:

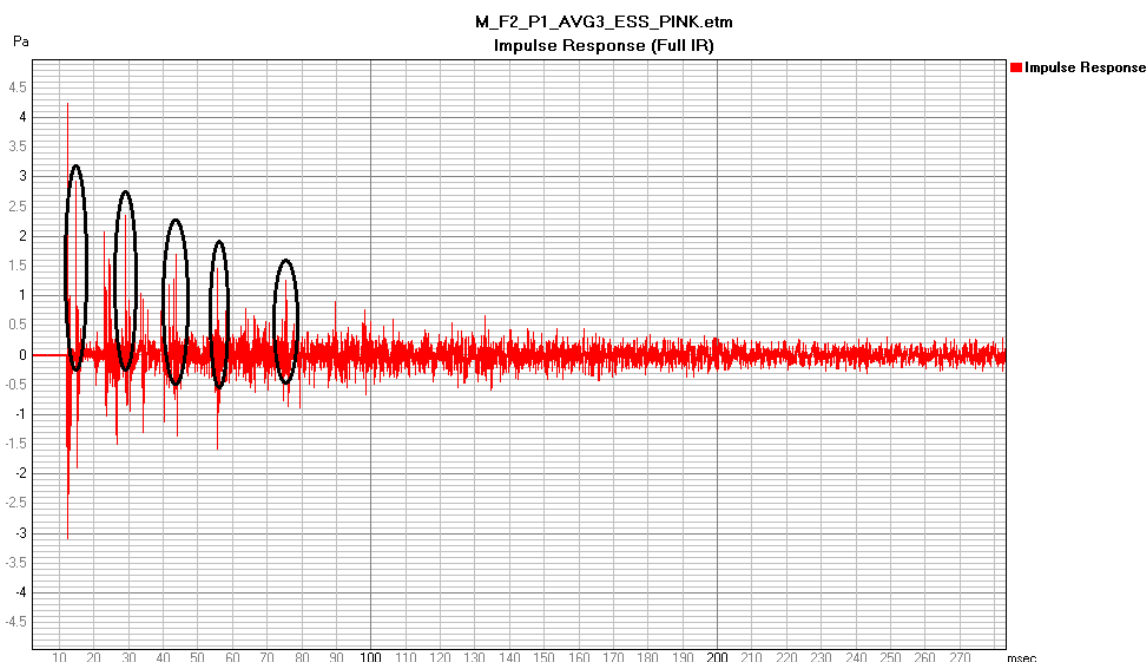


Figura 6.6: Respuesta impulsional medida y picos de nivel sonoro en la *Sala Polivalent* con *EASERA* (posición fuente F2, receptor P1)

En la respuesta impulsional de la figura aparecen una serie de picos que destacan en el gráfico y son prácticamente equidistantes. Teniendo en

cuenta las diferencias temporales entre los picos y la velocidad de propagación del sonido se calcula una distancia de aproximadamente 5 m entre ellos. Resulta complicado determinar qué superficies están implicadas y cuál es el camino de esas reflexiones. A pesar de que este análisis escapa del alcance de este trabajo, sí que vemos que existe un fenómeno de reflexiones repetitivas con un nivel sonoro relevante.

Las mediciones llevadas a cabo en la *Sala Polivalent* no forman parte del objetivo principal de este trabajo sino más bien sirven para confirmar algunas de las dificultades que anticipábamos en el capítulo introductorio.

La construcción de un modelo basado en las hipótesis de la formulación clásica para evaluar el  $RT$  de programas de simulación acústica presenta limitaciones. De todos modos resulta más simple que tomar una referencia de valores medidos en una sala real. Aun considerando un recinto aparentemente sencillo como la *Sala Polivalent* modelar las propiedades acústicas de las distintas superficies para comparar los valores estimados de las simulaciones con los de las mediciones no es una tarea sencilla. La absorción y dispersión de los materiales caracterizadas por los algoritmos de simulación pueden no corresponderse con el comportamiento real (el coeficiente de absorción  $\alpha$  se mide en condiciones de campo difuso [39] y la función de *Lambert* del modelo de difusión no deja de ser una aproximación a la realidad [180] [181]). En definitiva, no sabremos con certeza si las discrepancias encontradas se deben a las limitaciones del algoritmo en particular, del modelo geométrico en general y/o al no haber sabido caracterizar el comportamiento acústico del espacio.

## 6.4 Dificultades encontradas

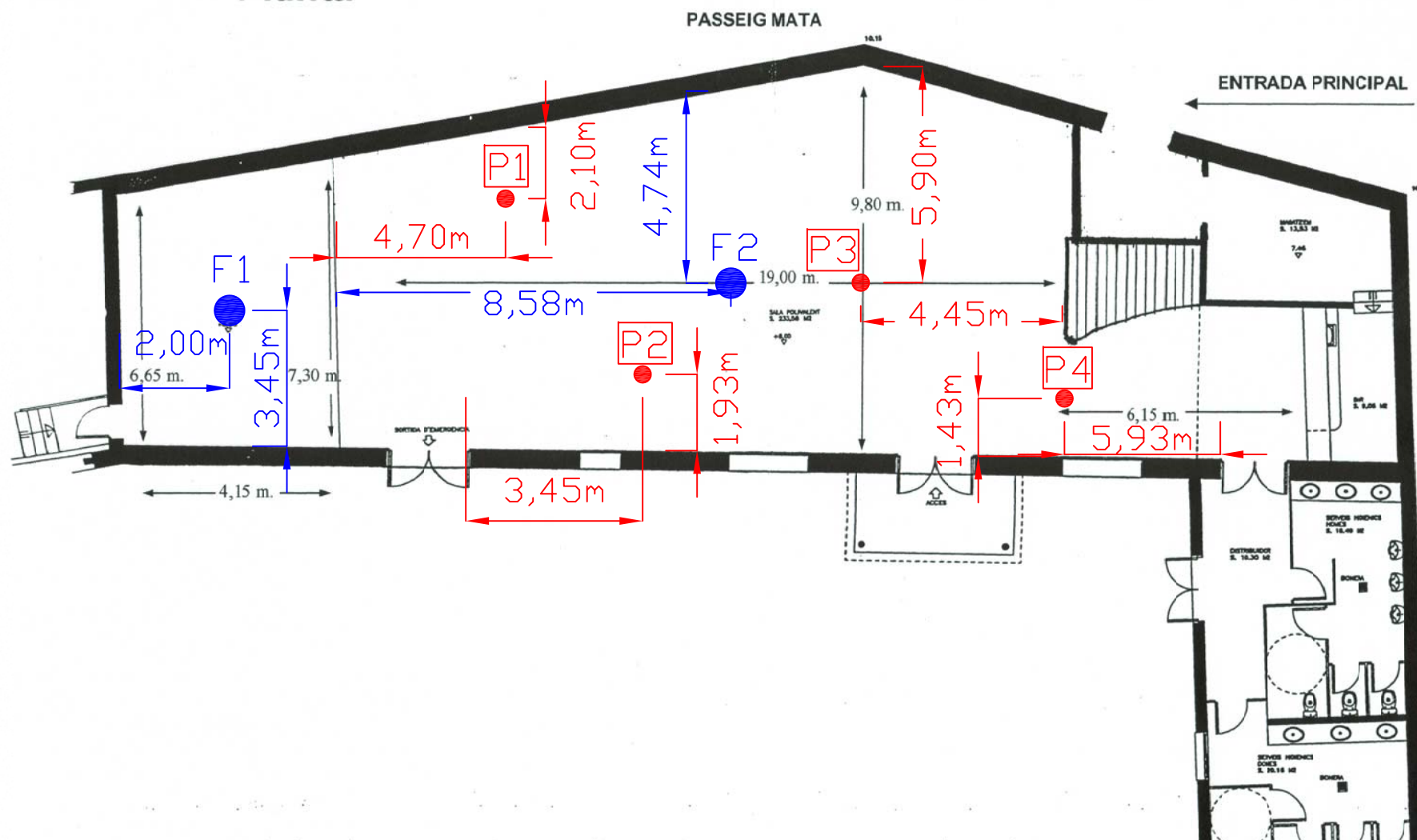
Las principales dificultades encontradas tienen que ver con la caracterización de las superficies de la *Sala Polivalent* para realizar las simulaciones en la sala real. Aunque no es objetivo principal del proyecto, este aspecto merece una mención y tiene suficiente entidad como para dedicarle un trabajo completo.

Una de las limitaciones importantes ha sido no disponer de los coeficientes de absorción de los materiales de la sala (de la mayoría probablemente ni existan esas especificaciones), por lo que se ha recurrido a bases de datos de elementos de construcción parecidos. Aquí reside una primera discrepancia en la comparación de resultados medidos con simulados. El montaje de estos materiales en el recinto influye también en la absorción (p. ej. cavidad de aire, distancia a la superficie límite) [182] y, si bien de algunas de estas configuraciones existen ensayos, de otras muchas no se disponen de datos. En estas situaciones prevalece una combinación de experiencia y conocimientos.

Otra variable muy importante y con suficiente entidad también para un estudio propio es la difusión de los elementos en el recinto. Caracterizar este parámetro para cada superficie es una empresa muy complicada y no garantiza el éxito puesto que este parámetro se basa en modelos (ver apartados a) y b) de [3.3.1]). En ocasiones y como se ha realizado en las simulaciones de la *Sala Polivalent*, se opta por ajustar un grado de difusión concreto en función del tipo de recinto y del tipo de superficies que se encuentran en la sala.

## **7 Apéndice. Cotas de ubicaciones de fuente y puntos de medida**

## Sala Polivalent “Planta”



### Cotas de las ubicaciones de fuente y puntos de medida

S/E



## **8 Anexo. Especificaciones de los equipos de medición**

## FP120 Fuente de Presión

*Altavoz omnidireccional BP012*

*Generador de Ruido/Amplificador AP600*

### Aplicaciones

- Medición del aislamiento en los edificios y de los elementos de construcción ISO 140
- Medición del tiempo de reverberación de salas ISO 3382
- Medición del coeficiente de absorción en cámara reverberante ISO 354

### Características principales

- Diagrama de directividad completamente omnidireccional
- 123 dB de Potencia Acústica
- Generador de ruido blanco, rosa y rosa filtrado, bandas de 1/3 de octava 100 – 5 kHz
- Sistema de refrigeración con apagado automático del ventilador: idóneo para mediciones de ruido de fondo
- Control remoto vía cable o transmisión inalámbrica (Bluetooth®)



La fuente de presión **FP120** esta compuesta por el Altavoz Omnidireccional **BP012** y el Amplificador / Generador de Ruido **AP600**.

La **FP120** ha sido diseñada para satisfacer las necesidades de los profesionales de la acústica arquitectónica y la acústica de la edificación. Con ella se pueden realizar mediciones de aislamiento acústico, tiempo de reverberación y absorción acústica según normas: ISO 3382, ISO 354 e ISO 140.

El **BP012** es un conjunto de 12 altavoces montados en un baffle dodecaédrico que asegura una emisión omnidireccional del ruido reproducido, cumpliendo los requisitos de directividad establecidos en las normativas ISO 140 e ISO 3382.

El **BP012** acepta una potencia de 600 W RMS y puede desarrollar 123 dB de potencia acústica en las bandas de tercio de octava de 100 a 5000 Hz. El altavoz está diseñado para proporcionar la máxima potencia durante más de una hora.

Para conseguir un cómodo manejo del **BP012**, este dispone de 5 topes de goma para soporte en suelo, 1 arandela para anclaje aéreo y 2 asas para transporte. El **BP012** esta internamente reforzado con un bastidor de aluminio que le proporciona robustez y le permite adaptarlo al trípode TR012.

El **AP600** es un conjunto formado por un generador de ruido rosa y blanco y un amplificador de potencia. El **AP600** ha sido especialmente diseñado para generar la señal a reproducir por el **BP012**.



Gracias a su salida de ruido interno y su entrada para ruido externo el **AP600** puede ser utilizado como generador de ruido + amplificador, solo como generador de ruido o solo como amplificador. Además permite insertar entre el generador de ruido y el amplificador equipos suplementarios de tratamiento de señal como ecualizadores o compresores.

El **AP600** dispone de protección anticlip y de protección térmica. El **AP600** puede ser operado directamente desde el teclado de que dispone o controlado por un ordenador a través del software suministrado. Esta comunicación con el ordenador puede ser vía cable o puede ser inalámbrica.

El sistema de refrigeración del **AP600** apaga el ventilador durante un minuto después de parar la reproducción de señal. Esto es ideal para la medición de ruido de fondo.



Transporte de la AP600



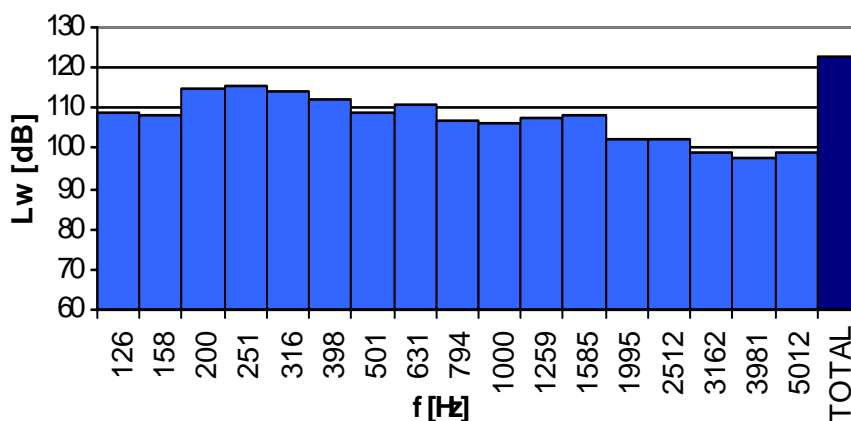
Caja de transporte FL012

#### Normas

ISO 140  
ISO 354  
ISO 3382

#### Potencia acústica

123 dB PWL (con ruido rosa, bandas de 1/3 de octava con frecuencias centrales comprendidas entre 100 – 5000 Hz) alimentado con el amplificador AP600. Para distribución por bandas, ver diagrama.



Distribución frecuencial de la potencia acústica del BP012

#### Omnidireccionalidad

La directividad del BP012 cumple los criterios de directividad exigidos en las normas ISO 140 e ISO 3382. Ver diagramas (pág. Siguiente).

#### Margen frecuencial operativo

Bandas de 1/3 de octava con frecuencias centrales comprendidas entre 100 – 5000 Hz.

#### Potencia máxima de entrada

600 W rms

#### Impedancia nominal

6  $\Omega$

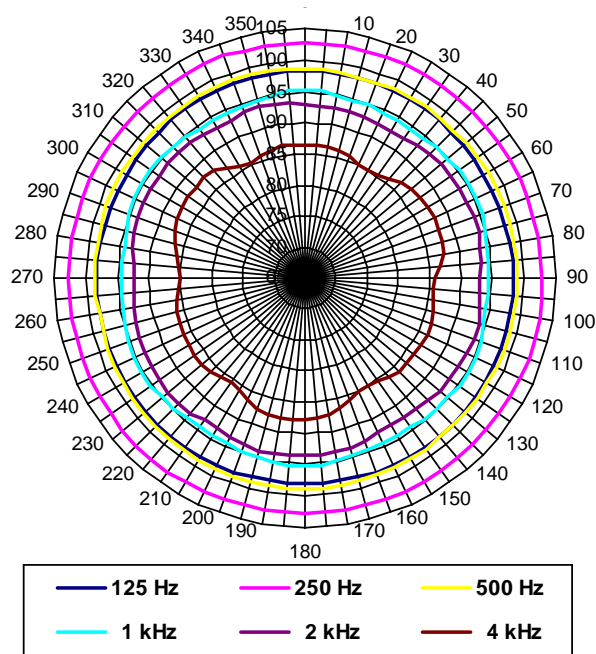
#### Conector

Speakon  $\odot$  de 4 pines (+1, -1)

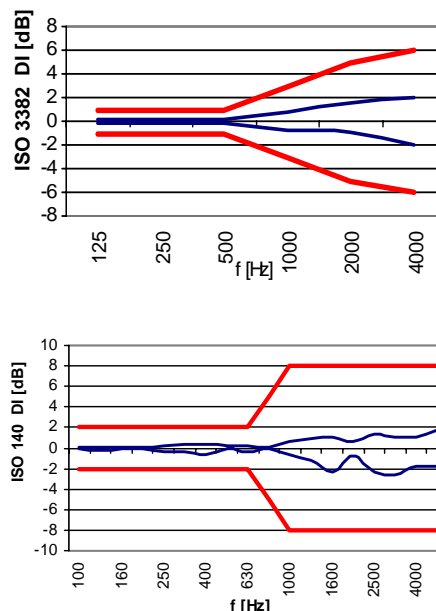
#### Dimensiones y Peso

Diámetro: 40 cm  
Peso: 19,7 kg

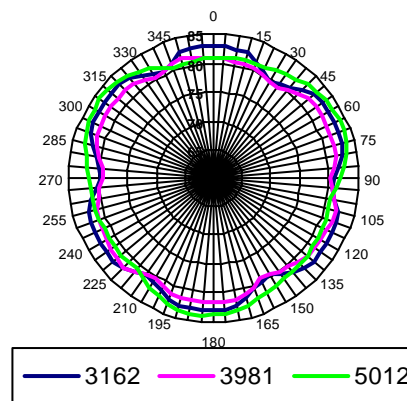
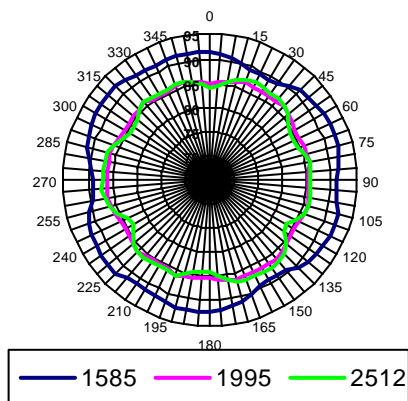
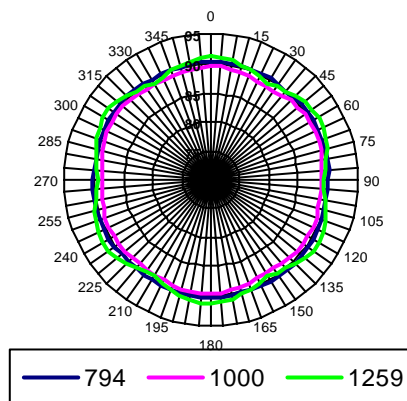
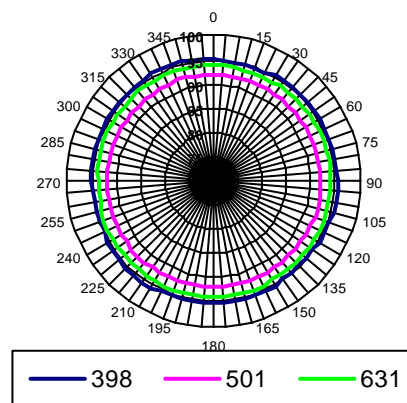
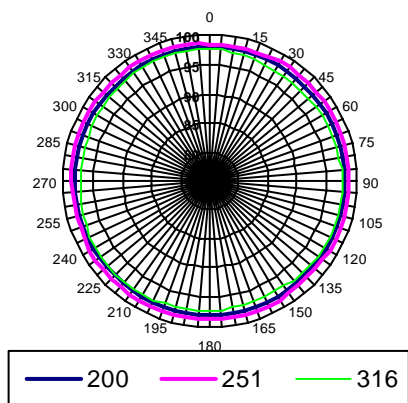
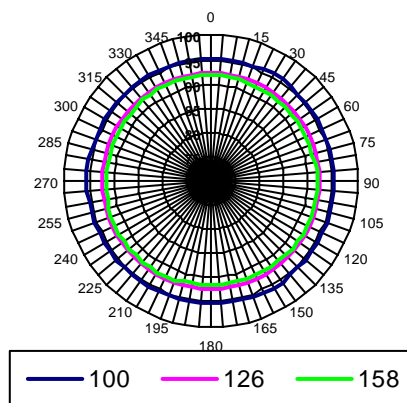
Diagrama de Directividad para las bandas de octava centradas a 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz



Directividad (D) del BP012 según norma ISO 140 e ISO 3382:



Diagramas de directividad para las bandas de tercio de octava de 100 Hz, 125 Hz, 160 Hz, 200 Hz, 250 Hz, 315 Hz, 400 Hz, 500 Hz, 630 Hz, 800 Hz, 1000 Hz, 1250 Hz, 1600 Hz, 2000 Hz, 2500 Hz, 3150 Hz, 4000 Hz y 5000 Hz:



## FP120 Fuente de Presión

### Especificaciones técnicas Generador de Ruido AP600



Conjunto FP120



Generador de Ruido AP600

#### Potencia de salida

4 $\Omega$ :	940	W
6 $\Omega$ :	680	W
8 $\Omega$ :	550	W

#### Respuesta frecuencial

6 – 90000	Hz
-----------	----

#### Distorsión Armónica Total

a 1kHz. y Media potencia	< 0,07	%
--------------------------	--------	---

#### Relación señal ruido

> 85	dB
------	----

#### Factor damping

a 1 kHz y 8 $\Omega$	> 300
----------------------	-------

#### Slew rate

$\pm 80$	V $\mu$ s
----------	-----------

#### Consumo

1560	VA
------	----

#### Entradas y salidas: conectores

- Salida Altavoz : Speakon<sup>®</sup> de 4 pines (+1, -1)
- Salida señal de línea: XLR macho: pin1 → masa, pin2 → señal, pin3 → libre.
- Entrada señal de línea: XLR hembra: pin1 → masa, pin2 → señal, pin3 → libre.
- Salida de alimentación continua: Jack de 5 mm  $\varnothing$  ext, 2,1 mm  $\varnothing$  int, 9,5 mm
- Puerto RS-232 : SubD hembra de 9 pines
- Salida señal de línea: USB tipo B

#### Indicadores

CLIP: Indicador de recorte excesivo de la señal

TH: Indicador de excesivo calentamiento

PROT: Indicador de Protección

#### Dimensiones y Peso

Dimensiones:	585 x 455 x 215	cm
Peso:	25	kg





Trípode para BP012



Cable CN012

**Trípode TR012:** Trípode para el soporte de la BP012, permite situarla a diferentes alturas: desde 1,0 m hasta 2,5 m

**Flightcase FL012:** Caja de transporte en formato rack para trasladar el BP012. El FL012 ha sido diseñado como un trolley para facilitar su movilidad.

**Cable CN012:** Cable de altavoz de 10 m de longitud con conector speakon de 4 pins en el extremo conectado al BP012. El conector del extremo del amplificador es también speakon de 4 pins. Opcionalmente se pueden suministrar cables de longitud y conectores (XLR, Jack, banana, open) distintos al estándar.

**Bolsa de transporte BM012:** Bolsa de tela para transporte del BP012.

**Software SF600:** Software para el control remoto del AP600

**Cable USB CN2US:** Cable USB para la comunicación del AP600 con un ordenador

**Módulo Bluetooth™ BT001:** Módulo Bluetooth para comunicaciones inalámbricas para el AP600.

#### Accesorios Suministrados

---

FL012	Flightcase
CN012	Cable de altavoz
CN2US	Cable USB

#### Accesorios Opcionales

---

TR012	Trípode
BM012	Bolsa de Transporte
BT001	Dispositivo Bluetooth™ para fuente de presión
BT002	Dispositivo Bluetooth™ para PC

*Las características, especificaciones técnicas y accesorios pueden variar sin previo aviso*



## Technical Specifications

Version 1.2 July 2000

ENGLISH

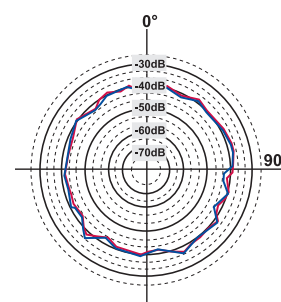
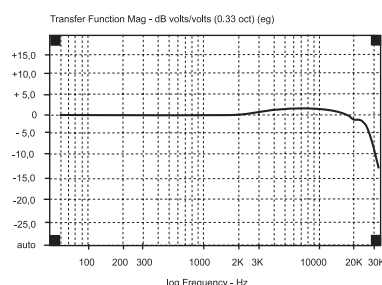
### MEASUREMENT MICROPHONE

#### FEATURES

- ▲ Precise electret condenser measurement microphone
- ▲ Ultra-linear frequency response
- ▲ Well-balanced, true omni-directional pattern
- ▲ Optimally suited for room correction applications
- ▲ Phantom powered, +15 V to +48 V
- ▲ Rugged construction and sleek, modern design
- ▲ Microphone stand adapter and windscreen for outdoor measurement included
- ▲ Perfect for use with the ULTRA-CURVE DSP8000 / ULTRA-CURVE PRO DSP8024 or any other real-time analyzer
- ▲ Manufactured under the BEHRINGER quality control

#### SPECIFICATIONS

Type	electret condenser, omni-directional
Impedance	600 Ohms
Sensitivity	-60 dB
Frequency response	15 Hz to 20 kHz
Connector	gold-plated XLR
Phantom power	+15 V to +48 V
Weight	app. 120 g



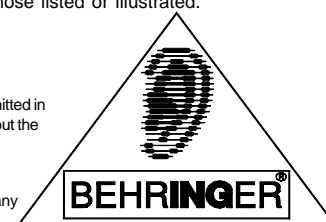
BEHRINGER is constantly striving to maintain the highest professional standards. As a result of these efforts, modifications may be made from time to time to existing products without prior notice. Specifications and appearance may differ from those listed or illustrated.

The information contained in this sheet is subject to change without notice. No part of this sheet may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and recording of any kind, for any purpose, without the express written permission of BEHRINGER Spezielle Studiotechnik GmbH.

BEHRINGER and ULTRA-CURVE are registered trademarks. ALL RIGHTS RESERVED.

© 2000 BEHRINGER Spezielle Studiotechnik GmbH.

BEHRINGER Spezielle Studiotechnik GmbH, Hanns-Martin-Schleyer-Str. 36-38, 47877 Willich-Münchheide II, Germany  
Tel. +49 (0) 21 54 / 92 06-0, Fax +49 (0) 21 54 / 92 06-30



[www.behringer.com](http://www.behringer.com)

## 9 Referencias

- [1] L. Beranek, «Acoustics and the Concert Hall,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 57, pp. 1258-1262, 1975.
- [2] A. Carrión, "Diseño acústico de espacios arquitectónicos", Barcelona: Edicions UPC, 1998, pp. 67-70.
- [3] A. Carrión, "Diseño acústico de espacios arquitectónicos", Barcelona: Edicions UPC, 1998, pp. 225-226.
- [4] "Ordenança del Medi Ambient de Barcelona", 2011.
- [5] "Código Técnico de la Edificación", 2006.
- [6] W. Sabine, "Collected Papers on Acoustics", Harvard University Press, 1922.
- [7] C. Eyring, «Reverberation time in "Dead" Rooms,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 1, pp. 217-241, 1930.
- [8] G. Millington, «A modified formula for reverberation,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 4, pp. 69-82, 1932.
- [9] D. Fitzroy, «Reverberation formula which seems to be more accurate with nonuniform distribution of absorption,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 31, pp. 893-897, 1959.
- [10] H. Kuttruff, «Nachhall und effektive Absorption in Räumen mit diffuser Wandreflexion,» *Acustica*, vol. 32, nº 3, pp. 141-153, 1976.
- [11] H. Arau-Puchades, «An Improved Reverberation Formula,» *Acta Acust. united Ac.*, vol. 65, pp. 163-180, 1988.
- [12] T. Vigran y S. Sorsdal, «Comparison of methods for measurement of reverberation time,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 48, nº 1, pp. 1-13, 1976.



- [13] L. Beranek, "Acústica", 2a ed., Buenos aires: Hispano Americana, 1969, pp. 3-5.
- [14] A. Zuckerwar, "Handbook of the Speed of Sound in Real Gases", Academic Press, 2002.
- [15] R. Bartí Domingo, "Acústica medioambiental", vol. 1, San Vicente (Alicante): ECU, 2010, pp. 22-26.
- [16] L. Kinsler et al., "Fundamentals of Acoustics", 4a ed., Wiley, 2000, pp. 318-320.
- [17] R. Watson y O. Downey, "The Little Red Book of Acoustics", Blue Tree Acoustics, 2008, p. 45.
- [18] G. Ballou, "Handbook for Sound Engineers", G. Ballou, Ed., Focal Press, 2015, p. 28.
- [19] H. Arau, "ABC de la acústica arquitectónica", CEAC, 2007, pp. 34-35.
- [20] R. Bracewell, "The Fourier Transform and Its Applications", 3a ed., McGraw-Hill, 2000, pp. 136-140.
- [21] H. Arau, "ABC de la acústica arquitectónica", CEAC, 2007, p. 35.
- [22] UNE-EN ISO 3382-2, «Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios,» 2008.
- [23] W. Sabine, "Collected Papers on Acoustics", Harvard University Press, 1922, p. 42.
- [24] G. Vijayakumari, "Engineering Physics", Vikas, 2007, p. 11.
- [25] M. Barron, "Auditorium Acoustics and Architectural Design", Oxon: Spon Press, 2010, p. 16.
- [26] R. Heyser, «The ETC and Instantaneous Intensity,» *College Archives & Special Collections*, 1982.

- [27] B. Sankar y S. Pillai, "A Textbook of Engineering Physics", New Age International, 2008, p. 26.
- [28] Brüel & Kjaer, «A new Device for Reverberation Measurements of Rooms and Loudspeakers,» Teletechnical, Acoustical and Medical Research, 1952.
- [29] R. Acoustics, "Smaart 7 Impulse Response Measurement and Analysis Guide", 2015.
- [30] Layer 8. Inc, "The Intelligibility Project - Measured v. Predicted", 2014.
- [31] M. Schroeder, «New Method of Measuring Reverberation Time,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 37, p. 409, 1965.
- [32] T. Roosing, "Springer Handbook of Acoustics", Springer, 2007, p. 330.
- [33] R. Ratnam et al., «Blind estimation of reverberation time,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 114, p. 2877, 2003.
- [34] C. Sujatha, "Vibration And Acoustics", McGraw-Hill, 2010, p. 444.
- [35] W. Cavanaugh, G. Tocci y J. Wilkes, "Architectural Acoustics: Principles and Practice", Wiley, 2010, p. 139.
- [36] V. Jordan, «Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model techniques,» *J. Soc. Acoust. Am.*, vol. 2, pp. 408-412, 1970.
- [37] V. Jordan, "Acoustical Design of Concert Halls and Theatres : a personal account", Applied Science Publishers, 1980.
- [38] G. Soulodre y J. Bradley, «Subjective evaluation of new room acoustic measures,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 98, p. 294, 1995.
- [39] UNE-EN ISO 354, «Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante,» 2003.

- [40] K. Jambrosic, M. Horvat y H. Domitrovic, «Reverberation time measuring methods,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, p. 3617, 2008.
- [41] «Norsonic,».Available:  
<http://www.norsonic.com/?module=Articles&action=Article.publicOpen&id=503>.
- [42] CTE, «Guía de aplicación del DB HR. Protección frente al ruido,» 2014.
- [43] M. Barron, "Auditorium Acoustics and Architectural Design", Oxon: Spon Press, 2010, p. 29.
- [44] M. Kleiner, "Acoustics and Audio Technology", 3a ed., J.Ross, 2012, pp. 101-107.
- [45] M. Schroeder, «The "Schroeder frequency" revisited,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 99, p. 3240, 1996.
- [46] D. Skarlatos y D. Kostakis, «A statistical approach for the diffusion of sound by reflecting surfaces in large enclosures,» *Applied Acoustics*, vol. 47, pp. 67-81, 1996.
- [47] H. Kuttruff, "Room Acoustics", 5a ed., Spon Press, 2009, p. 85.
- [48] M. Skalevik, «Schroeder frequency revisited,» de *Proceedings of Forum Acusticum*, Aalborg, 2011.
- [49] T. Cox y P. D'Antonio, "Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, Design and Application", Spon Press, 2005, p. 11.
- [50] H. Kuttruff, "Acoustics: An Introduction", Taylor & Francis, 2007, pp. 258-260.
- [51] P. Morse y K. Ingard, "Theoretical Acoustics", New Jersey: Princeton University Press, 1987, pp. 576-577.
- [52] H. Kuttruff, "Room Acoustics", 5a ed., Spon Press, 2009, pp. 101-102.
- [53] F. Everest y K. Pohlmann, "Master Handbook of Acoustics", McGraw-Hill, 2009, pp. 229-230.

- [54] C. Jeong, J. Ih y J. Rindel, *"Consideration of Wall Reflection and Diffraction in the Room Acoustic Prediction Using the Phased Beam Tracing Method"*, Ph.D. thesis, 2007.
- [55] G. Ballou, *"Handbook for Sound Engineers"*, Focal Press, 2015, p. 98.
- [56] G. Ballou, *"Handbook for Sound Engineers"*, Focal Press, 2015, p. 220.
- [57] B.-I. Dalenbäck, «The Importance of Diffuse Reflection in Computerized Room Acoustic Prediction and Auralization,» *Proc. IOA*, vol. 17, pp. 24-34, 1995.
- [58] M. Kleiner, P. Svensson y B.-I. Dalenbäck, «A Macroscopic View of Diffuse Reflection,» *JAES*, vol. 42, pp. 807-973, 1994.
- [59] W. Joyce, «Effect of surface roughness on the reverberation time of a uniformly absorbing spherical enclosure,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 64, pp. 1429-1436, 1978.
- [60] N. Baines, *"An investigation of the factors which control non diffuse sound fields in rooms"*, Southampton: Ph.D. Thesis, 1983.
- [61] M. Aretz, *"Combined Wave and Ray based Room Acoustic Simulations of Small Rooms"*, Berlin: Logos, 2012.
- [62] UNE-EN ISO 140, «Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción,» 1999.
- [63] W. Sabine, *"Collected Papers on Acoustics"*, Harvard University Press, 1922, pp. 9-23.
- [64] E. Berger, *"The noise manual"*, AIHA, 2003, p. 30.
- [65] K. Korven, *"Sound absorption coefficient as a function of angle of incidence"*, Master's Thesis, 2006, pp. 35-36.
- [66] P. Heyl, V. Chrisler y W. Snyder, «The Absorption of Sound at Oblique Angles of Incidence,» *B.S.J.R*, vol. 4, pp. 289-296.
- [67] CISCA, *"Noise Control for Buildings"*, pp. 21-28.

- [68] Y.-H. Kim, "Sound Propagation: An Impedance Based Approach", Wiley, 2010, p. 274.
- [69] J. Navarro, J. Escolano y L. J.J., «A Physically-Based Model for Fast Prediction of the Reverberation Time in Room Acoustic Applications,» de *Proc. of the EAA Symposium on Auralization*, Espoo, 2009.
- [70] F. Hunt, «Remarks on the Mean Free Path Problem,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 36, p. 556, 1964.
- [71] W. Sabine, "Collected Papers on Acoustics", Harvard University Press, 1922, p. 37.
- [72] W. Sabine, "Collected Papers on Acoustics", Harvard University Press, 1922, pp. 43-52.
- [73] L. Beranek, "Acústica", Buenos Aires: Hispano Americana, 1969, p. 323.
- [74] L. Kinsler et al., "Fundamentals of Acoustics", Wiley, 2000, p. 338.
- [75] L. Beranek, "Acústica", Buenos Aires: Hispano Americana, 1969, pp. 328-331.
- [76] C. Harris, «Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 40, p. 148, 1966.
- [77] U. Stephenson, «A rigorous definition of the term "diffuse sound field" and a discussion of different reverberation formulae».
- [78] E. De Ruiter, «Time to reconsider Reverberation Time,» *1st EAA Congress*, 2010.
- [79] M. Barron, «Non-linear decays in simple spaces and their possible exploitation,» *Proceedings of the Institute of Acoustics*, vol. 34, 2011.
- [80] U. Stephenson, «Different assumptions - Different Reverberation Formulae,» de *Inter-Noise*, New York, 2012.

- [81] M. Kleiner, "Acoustics and Audio Technology", J.Ross, 2012, pp. 89-91.
- [82] I. Rossell y P. Artís, «Reverberation Time in Rooms with non-diffuse sound field,» *Proceedings of the ISRA*, vol. 3, 2007.
- [83] H. Kuttruff, "Room Acoustics", Spon Press, 2009, pp. 131-133.
- [84] A. Reyes, "AutoCAD 2016", Anaya, 2015.
- [85] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, pp. 60-61.
- [86] V. Pulkki, «Laboratory of Acoustics and Audio Signal Processing,».Available:  
<http://users.spa.aalto.fi/ville/diffrvisual/basicidea.html>.
- [87] F. Mechel, «Improved Mirror Source Method in Room Acoustics,» *Journal of Sound and Vibration*, vol. 256, pp. 873-940, 2002.
- [88] H. Nironen, "Diffuse Reflections in Room Acoustics Modelling", Master's Thesis, 2004, p. 31.
- [89] J. Rindel, "Room Acoustic Prediction Modelling", Salvador: XXIII Encontro SOBRAC, 2010.
- [90] J. Allen y D. Berkley, «Image method for efficiently simulating small-room acoustics,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 65, p. 943, 1979.
- [91] J. Borsih, «Extension of the image model to arbitrary polyhedra,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 75, p. 1827, 1984.
- [92] U. Svensson, R. Fred y J. Vanderkooy, «An analytic secondary source model of edge diffraction impulse responses,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 106, p. 2331, 1999.
- [93] J. Rindel y C. Christensen, «Room acoustic simulation and auralization - How close can we get to the real room?,» *Proceedings of Eighth Western Pacific Acoustics Conference*, 2003.

- [94] L. Savioja, J. Huopaniemi, T. Lokki y R. Väänänen, «Creating Interactive Virtual Acoustic Environments,» *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 47, p. 675, 1999.
- [95] J. Rindel, «Computer Simulation Techniques for Acoustical Design of Rooms - How to treat reflections in sound field simulation,» *Proceedings of ASVA 97. The Acoustical Society of Japan and The Institute of Noise Control Engineering of Japan*, pp. 201-208, 1997.
- [96] E. Lehmann, A. Johansson y S. Nordholm, «Reverberation-Time Prediction Method for Room Impulse Responses Simulated with the Image-Source Model,» *IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*, 2007.
- [97] A. Kulowski, «Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique,» *Applied Acoustics*, vol. 18, pp. 449-469, 1985.
- [98] D. Oliva, "*Room Acoustic Modelling using the Ray Tracing Method: Implementation and Evaluation*", Licentiate Thesis, 2005, p. 32.
- [99] H. Kuttruff, "*Room Acoustics*", Spon Press, 2009, p. 320.
- [100] B.-I. Dalenbäck, «Engineering principles and techniques in room acoustics prediction,» de *BNAM*, 2010.
- [101] H. Kuttruff, "*Room Acoustics*", Spon Press, 2009, p. 122.
- [102] A. Fjaerli, "*Room geometries with non classical reverberation times*", Master's Thesis, 2015, p. 21.
- [103] D. Johnson y H. Lee, «Investigation into the Perceptual Effects of Image Source Method Order,» de *AES Convention*, 2016.
- [104] J. Rindel, «Computer Simulation Techniques for Acoustical Design of Rooms,» *Acoustics Australia*, vol. 23, pp. 81-86, 1995.
- [105] M. Van der Voorden, L. Nijs, G. Vermeir y G. Jansens, «The Applicability of Ray-tracing Based Simulation Tools to Predict Sound Pressure Levels and Reverberation Times in 'Coupled Spaces',» de *IBPSA Conference*, 1999.

- [106] ADA, «EASE-AFMG,»  
Available: <http://ease.afmg.eu/index.php/room-rt.html>.
- [107] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, pp. 224-226.
- [108] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, p. 275.
- [109] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, p. 264.
- [110] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, pp. 230-231.
- [111] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, pp. 288-289.
- [112] M. Vorländer, «Simulation of the transient and steady state sound propagation in rooms using a new combined sound particle - image source algorithm,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, p. 172, 1989.
- [113] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, pp. 320,323.
- [114] O. Schmitz, S. Feistel, W. Ahnert y M. Vorländer, «Grundlagen raumakustischer Rechenverfahren und ihre Validierung,» de *Fortschritte der Akustik - DAGA*, Hamburg, 2001.
- [115] J. Amanatides y A. Woo, «A Fast Voxel Traversal Algorithm for Ray Tracing,» de *Eurographics '87 Conference Proceedings*, 1987.
- [116] S. Feistel, W. Ahnert, A. Mirron y O. Schmitz, «Improved methods for calculating room impulse responses with ease 4.2 AURA,» de *19th ICA*, Madrid, 2007.
- [117] ADA, "EASE 4.3. User's Guide & Tutorial", 2009, p. 232.
- [118] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, p. 328.
- [119] S. Feistel, «AFMG Forum,». Available: <http://afmg-network.com/viewtopic.php?t=743&sid=e4d781e8a946b3b4ef9feabc3f93e9cc>.
- [120] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, pp. 328-329.



- [121] M. Lautenbach y M. Vercammen, «Reflection At Room Boundaries In Computer Simulation Programs Based On Ray-Tracing,» de *NAG/DAGA congres*, 2009.
- [122] G. Ballou, "Handbook for Sound Engineers", Focal Press, 2015, pp. 1373-1374.
- [123] ADA, "*EASE 4.1. Tutorial*", 2004, p. 236.
- [124] "*CATT-A v9.0. User's Manual*", 2011, p. 61.
- [125] "*CATT-A v9.0. User's Manual*", 2011, pp. 153-158.
- [126] I. Drumm y Y. Lam, «The adaptative beam-tracing algorithm,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 107, pp. 1405-1412, 2000.
- [127] G. Ballou, "Handbook for Sound Engineers", Focal Press, 2015, p. 1372.
- [128] U. Svensson y U. Kristiansen, «Computational Modelling and Simulation of Acoustic Spaces,» de *Proc. of the AES 22nd International Conference*, 2002.
- [129] B.-I. Dalenbäck, «Verification of prediction based on randomized tail-corrected cone-tracing and array modeling,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 105, p. 1173, 1999.
- [130] D. Oliva, «Room Acoustic Modelling using the Ray Tracing Method: Implementation and Evaluation,» 2005.
- [131] H. Nironen, "*Diffuse Reflections in Room Acoustics Modelling*", Master's Thesis, 2004, p. 44.
- [132] B.-I. Dalenbäck, «Room acoustic prediction based on a unified treatment of diffuse and specular reflection,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, p. 899, 1996.
- [133] B.-I. Dalenbäck, «Reverberation time, diffuse reflection, Sabine, and computerized prediction - part I.,» 1999. Available: <http://www.catt.se/diffseries/index.htm>.
- [134] "*TUCT v1.0g. User's Manual*", CATT, 2011, pp. 48-49.

- [135] M. Vorländer, "Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality", Springer, 2007, p. 210.
- [136] "TUCT v1.0g. User's Manual", CATT, 2011, p. 82.
- [137] D. Murrillo, "Interactive Auralization based on Hybrid Simulation Methods and Plane Wave Expansion", Thesis, 2016, p. 33.
- [138] O. Saad, Thesis: "The Prediction and Validation of Acoustical Behavior with Computer Models", Massachusetts: MITLibraries, 2004, p. 12.
- [139] "CATT-A v9.0. User's Manual", 2011, pp. 55-56.
- [140] "CATT-A v9.0. User's Manual", 2011, pp. 56-57.
- [141] "CATT-A v9.0. User's Manual", 2011, pp. 93-103.
- [142] "TUCT v1.0g. User's Manual", CATT, 2011, p. 83.
- [143] D. Maa, «The Flutter Echoes,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 13, p. 170, 1941.
- [144] M. Kleiner y J. Tichy, "Acoustics of Small Rooms", CRC Press, 2014, p. 366.
- [145] B.-I. Dalenbäck, «A New Model for Room Acoustic Prediction and Auralization,» *Chalmers P.L.*, 1995.
- [146] "CATT-A v9.0. User's Manual", 2011, p. 69.
- [147] "TUCT v1.0g. User's Manual", CATT, 2011, pp. 49-50.
- [148] "TUCT v1.0g. User's Manual", CATT, 2011, pp. 3-4.
- [149] «Cálculo de la densidad del aire (fórmula CIPM-1981/91),» Available:  
[http://www.dolzgnos.com.ar/htm/densidad\\_del\\_aire.html](http://www.dolzgnos.com.ar/htm/densidad_del_aire.html).

- [150] D. Brown, *"The Effectiveness of the Electro-Acoustical Simulator for Engineers (EASE) in Determining Room Acoustics"*, Reserch Science Institute, 1995, p. 4.
- [151] ADA, *"EASE 4.1. Tutorial"*, 2004, p. 328.
- [152] J. Garrido, T. Zamarreño, S. Girón y D. Ruiz-Padillo, «Perceived Feasibility of Computer-Generated Auralization in Concert Halls,» de ISVA, Valencia, 2011.
- [153] S. Norcross y J. Bradley, «Comparison of Room Impulse Response Measurement Methods,» *JCAA*, vol. 22, nº 3, 1994.
- [154] J. Pätynen, B. Katz y T. Lokki, «Investigations on the Balloon as an Impulse Source,» *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 129, 2011.
- [155] M. Lamothe y J. Bradley, «Acoustical Characteristics of Guns as Impulse Sources,» *JCAA*, vol. 13, nº 2, 1985.
- [156] B. Waslo, «Maximum Length Sequence (MLS) based measurements with LAUD (from "The IMP Goes MLS" in Speaker Builder Magazine),» 1993. Available: <http://www.libinst.com/mlsmeas.htm>.
- [157] D. Rife y J. Vanderkooy, «Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences,» *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 37, pp. 419-444, 1989.
- [158] J. Berman y L. Fincham, «The Application of Digital Techniques to the Measuremen of Loudspeakers,» *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 25, pp. 370-384, 1977.
- [159] F. Policardi, «MLS and Sine-Sweep Technique Comparison in Room-Acoustic Measurements,» *Elektrotehniski Vestnik*, vol. 78, pp. 91-95, 2011.
- [160] J. Borish y J. Angell, «An Efficient Algorithm for Measuring the Impulse Response using Pseudorandom Noise,» *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 31, pp. 478-488, 1983.
- [161] W. Davies, «Generation and properties of maximum-length sequences,» *Control*, pp. 302-304,364-365,431-433, 1966.

- [162] S. Golomb, "Shift-Register Sequences", Aegan Park Press, 1982.
- [163] M. Perret, «Implementation of a M-Sequence Pseudo Random Binary Sequence audio measurement system based on the Hadamard transform,» *University College London*, 2010.
- [164] G.-B. Stan, J.-J. Embrechts y D. Archambeau, «Comparison of Different Impulse Response Measurement Techniques,» *JAES*, vol. 50, pp. 249-262, 2002.
- [165] R. Martin, U. Heute y C. Antweiler, "Advances in Digital Speech Transmission", Wiley, 2008, p. 172.
- [166] N. Ream, «Nonlinear Identification using Inverse-repeat M sequences,» de *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 1970.
- [167] A. Farina, «Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique,» 2000.
- [168] M. Garai y P. Guidorzi, «Optimizing the exponential sine sweep (ESS) signal for in situ measurements on noise barriers,» de *Proc. Euronoise*, Maastricht, 2015.
- [169] A. Novak, L. Simon, F. Kadlec y P. Lotton, «Nonlinear System Identification Using Exponential Swept-Sine Signal,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, pp. 2220-2229, 2010.
- [170] P. Guidorzi, L. Barbaresi, D. D'Orazio y M. Garai, «Impulse responses measured with MLS or Swept-Sine signals applied to architectural acoustics: an in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters,» *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 1611-1616, 2015.
- [171] K. Vetter y S. Di Rosario, «ExpoChirpToolbox: a Pure Data implementation of ESS impulse response measurement Katja Vetter,» de *Pure Data Convention*, Weimar, 2011.
- [172] A. Farina, «Advancements in Impulse Response Measurements by Sine Sweeps,» de *AES Convention*, 2007.

- [173] «ARTA. Audio Measurement and Analysis Software,». Available: <http://www.artalabs.hr/>.
- [174] «Material extraído de un documento de la Universidad Politècnica de Valencia,». Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17788/materials.pdf?sequence=2>.
- [175] D. Templeton y P. Lord, "Detailing for Acoustics", 193-194 ed., Taylor & Francis, 1996.
- [176] «Material extraído de la web JCWA Acoustic Supplies,». Available: <http://soundproofyourhome.com/absorption-coefficient-chart/>.
- [177] «Material extraído de la web de Bunker Audio,». Available: <https://www.bunker-audio.com/bunker-audio-portal-sonido-documentos.php?id=3>.
- [178] «Material extraído de la base de datos de EASE,».
- [179] ADA, "EASE 4.1. Tutorial", 2004, p. 264.
- [180] J. Rindel, «Scattering in room acoustics and related activities in ISO and AES,» de *Procc. 17th International Congress on Acoustics*, Rome, 2001.
- [181] T. Cox y P. D'Antonio, «Contrasting surface diffusion and scattering coefficients,» de *Procc. International Congress on Acoustics*, Rome, 2002.
- [182] M. Crocker, "Handbook of Noise and Vibration Control", Wiley, 2007, pp. 60-64.